

# A félvezetőalapú integrált mikroelektronika, mint a harmadik generációs elektronikai rendszerek elembázisa

ETO 621.3.049.77:681.3

A tudomány és technika, valamint az ipari és mezőgazdasági termelés hatékonyságának további növelése érdekében az emberi tevékenység minden területén szükség van az elektronikai rendszerek széles körű alkalmazására.

A mikroelektronika megszületését és fejlődését jelentősen elősegítette a kisméretű rádiótechnikai berendezések és rendszerek létrehozásának szükségessége. Az integrált áramkörök alkalmazása a megbízhatóság növelése mellett lehetővé teszi elektronikai berendezések méretének és teljesítményfelvételének csökkenését is.

Az integrált mikroáramkörökön alapuló elektronikai berendezések említett tulajdonságai jelentősen kiszélesítik az elektronikai berendezések felhasználási területét. Ugyanakkor a mikroelektronika hosszútávú forradalmi szerepe nem annyira a technikai mint inkább a gazdasági szempontok következménye. A félvezetők mikroelektronikai technológiájával gyártott integrált áramkörök tömeggyártás esetén sokkal olcsóbbak, mint a diszkrét elektronikai elemekből összeállított ekvivalens áramkörök.

A félvezetőalapú mikroelektronikának jelenleg nincs olyan vetélytársa, amely hasonlóan eleget tudna tenni a nagy szériában gyártott elektronikai berendezések által az elemkészlet területén támasztott követelményeknek.

Az egy elektronikai áramkör létrehozására fordított idő 1 perc körül kell hogy legyen. Ilyen mutatók csak a félvezetők mikroelektronikai technológiájával érhetők el, amelynek legjelentősebb tényezője a csoportos jelleg. Valóban, pl. 50 milliárd elem elkészítése integrált áramköri formában, ha feltételezzük, hogy egy chipen 100 elem helyezkedik el, mindössze 500 millió fizikai egység vagyis áramkör elkészítését jelenti.

A mikroelektronikai eszközök integrált jellege a korszerű társadalmak ipari tevékenységének nagyfokú kibernetizálódását biztosítja. Meg kell azonban jegyeznünk, hogy az elektronikai eszközök nem minden típusa állítható elő a korszerű mikroelektronika segítségével, így itt elsősorban a digitális vagy analóg információt feldolgozó, viszonylag kisteljesítményű kapcsoló eszközökről lesz szó.

## 1. A félvezetőalapú integrált áramkörök főbb jellemzői

Jelenleg a félvezetőalapú integrált áramköröknek széles nomenklatúrája áll rendelkezésre amelyet a



1. ábra. A félvezetőalapú integrált áramkörök osztályozása

működési sebesség, a felhasználás, a feldolgozandó információ jellege stb. szerint csoportosíthatunk (1. ábra).

A digitális jelfeldolgozó rendszerek integrált áramkörei a következő működési sebességekkel (késleltetési időkkel) és teljesítményfelvételekkel rendelkeznek (az adatok egy kapu egységre vonatkoznak): 300 ns, 0,5 mW; 100 ns, 1 mW; 50 ns, 3 mW; 20 ns, 10 mW; 10 ns, 20 mW; 3–5 ns, 40 mW; 2–3 ns, 40–60 mW.

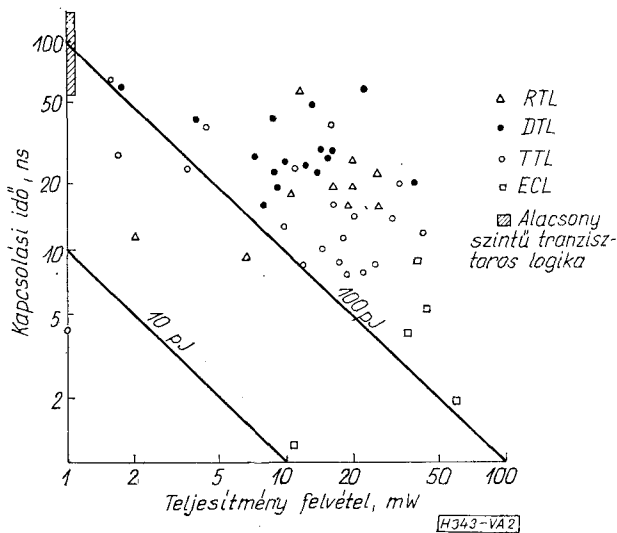
Az integrált áramkörök minőségi együtthatójának ( $\tau \cdot P = Q$ , a késleltetési idő és a teljesítményfelvétel szorzatának) alakulása különböző megmunkálási technológiák és áramköri kialakítás mellett a 2. ábrán látható.

A TTL típusú integrált áramkörsorozat 26 funkcionálisan különböző áramkörből áll (1. melléklet).

Nagysebességű számítógépek felépítésére 38 funkcionálisan különböző bonyolultabb felépítésű ultranagysebességű ECL integrált áramkört használnak (2. melléklet).

Az integrált áramkörök fontos osztályát képezik a számítógépek memóriaegységét kiszolgáló integrált áramkörök; így a beíró és kiolvasó áramkörök, valamint az olvasó erősítők. A számítógépek memóriaegységeiken használt mikroáramkör sorozat hozzáférési ciklusideje  $1 \mu\text{s}$ , árama pedig 500 mA-ig terjedhet.

A félvezetőalapú integrált áramköröknek új osztálya, a számítógépek aktív és fix memóriaegységeiként felhasználható integrált áramkörök. A viszonylag egyszerű áramköri felépítés következtében ezeknél az áramköröknél figyelhetők meg leginkább a félvezető



2. ábra. A logikai egység teljesítményfelvétele, mint a kapcsolási idő függvénye

alapú mikroelektronikában elért eredmények; léteznek 16, 64, 128, 256, 1024 bites bipoláris aktív, fix és programozható memória-áramkörök egy chipen, a hozzájuk tartozó dekódoló, kiolvasó, beíró egységekkel, valamint készülnek 10 kbit-es MIS memória-áramkörök. Ez azt jelenti, hogy egy chipen bipoláris áramköröknél 2,5–5 ezer elem, MIS szerkezeteknél pedig 5–10 ezer elem helyezhető el.

## 2. Integrált áramkörök tervezésének és technológiájának fejlesztési problémái

A félvezetőalapú integrált áramkör olyan összetett szerkezet, amely több száz vagy több ezer nem szét-szerelhető és nem javítható elemből áll. Az integrált áramköri chip meghatározott határfeltételek mellett működő, egységes félvezető szerkezetnek tekintendő.

Az integrált áramkörök sikeres tervezése és gyártása lehetetlen olyan hatékony gépi tervező rendszer nélkül, amely lehetővé teszi a rövid időtartamú integrált áramkörtervezést és az áramköri elemek geometriai méreteinek, valamint fizikai szerkezetének gyakorlati célokra megfelelő pontossággal történő meghatározását. Az ilyen rendszerek a leghatékonyabb, korszerű elektronikus számítógépeket használják és a tervezés elvégzése után rajzokat és táblázatokat készítenek.

Integrált áramkörök tervezésénél kiindulásul a félvezetőben a töltéshordozók viselkedését — adott határfeltételek mellett — leíró egyenlet szolgálhat. Az IC-k kivezetéseiben megjelenő áram függ az IC-re kapcsolt feszültségektől és a félvezető anyag alapvető fizikai tulajdonságaitól, mint például a hordozók rekombinációjának sebességétől, a hordozók mozgékonyaságától, a diffúziós együtthatótól stb.

Az egyenletrendszer megoldásához a parciális differenciál egyenleteket közönséges differenciál egyenletekké alakítják. Meghatározzák a tranzisztorok és más áramköri elemek elektromos paramétereit a geometriai méretek és a fizikai szerkezet alapján. Az áramköri elemek paramétereit olyan formában kell

hogy megkapjuk, amely alapján az adott elemekből álló mikroáramkör jellemzőit számítani tudjuk. A tranzisztorok ilyen jellegű elektromos helyettesítése a módosított Ebers-Moll modellen alapszik.

Az IC paramétereinek számítása a hálózatelméletből ismert módszerek segítségével történik. A legmunkaigényesebb számítás az IC-k optimalizálása, ahol az adott IC műszaki előírásainak legteljesebben megfelelő áramköri paraméter rendszert igyekeznek elérni az elemek geometriai méreteinek és fizikai szerkezetének változtatásával. Az optimalizáláshoz szükséges számítások mennyiségét felbecsülhetjük, ha figyelembe vesszük, hogy az IC elemek geometriájához hozzárendelt feltételes koordináta pontok mennyisége, amelyek helyzetét megadják és változtatják az optimalizálás során, néhányszor tízezres nagyságrendben van, sőt bonyolultabb integrált áramköröknél (memóriák) eléri a 250 ezret.

A tervezésre alkalmas számítógép rendszerekre feltétlenül szükség van az integrált mikroelektronika fejlesztéséhez, ezért kidolgozásukra nagy figyelmet kell fordítani.

Általában az integrált áramköri sorozatok alapvető paramétereinek tekintik a sorozat logikai egységének késleltetési idejét, vagyis azt az időt, amely a logikai egység „0” állapotából „1” állapotba (vagy fordítva) történő átváltásához szükséges.

$$\tau_{\text{kapcs}} = \tau_{01} + \tau_{10}$$

A késleltetési idő meghatározza, hogy az adott áramkörsorozat felhasználható-e egy bizonyos ismétlődési frekvenciával dolgozó elektronikus számítógépben. A logikai egység adott kapcsolási ideje mellett arra kell törekedni, hogy az egység a lehető legkisebb teljesítményt vegye fel.

Az analízis azt mutatja, hogy a jelenlegi technológiai szintre a kapcsolási idő és a teljesítményfelvétel sorozata, amely annak az energiának felel meg, amit a külső feszültségforrás egy logikai egységnek átad egy átkapcsolási ciklus alatt ( $\tau_{\text{kapcs}} \cdot P = Q$ ), 100 pJ körüli értéknek felel meg. A következő típusú logikai egységek ezen energiája között nincs jelentős eltérés: dióda-tranzisztor logikai egység (DLT), ellenállás-tranzisztor logikai egység (RTL), tranzisztor-tranzisztor logikai egység (TTL), emitter csatolású, telítésgátolt logikai egység (ECL), komplementer MIS szerkezetű logikai egység (K–MIS), injekciós logikai egység (IIL). A technológia és áramkörtechnika fejlődésével ezen átkapcsolási energia fokozatosan csökkenthető.

Így a logikai egységek sebessége általában csak a felvett teljesítmény növelése árán javítható. Az elektronikai berendezésekben a nagysebességű és ezáltal nagy teljesítményfelvételt integrált áramkörök felhasználása következtében egész sor nemkívánatos hatás lép fel: növekszenek a tápegységgel szemben támasztott követelmények, nő a vezetékek keresztmetszete, bonyolulttá válik a hőelvezetés mind a logikai egységen, mind pedig a berendezésen belül.

Ezért a félvezetőalapú mikroelektronikában sarkalatos kérdésnek látszik a teljesítményfelvétel csökkentési lehetőségeinek vizsgálata a sebesség változatlanul tartása mellett.

Ha a jelszintet  $V$ -vel, a  $Z$  impedanciájú logikai egység teljesítmény disszipációját pedig  $P$ -vel jelöljük, akkor:

$$P = V^2/Z$$

Ez a képlet figyelemre méltó információt tartalmaz. Feltételezhető, hogy a  $V$  jelszint összemérhető a feszültségforrásról a logikai egységre jutó feszültség-szinttel. Akkor pedig a teljesítmény disszipáció mértékét azok a tényezők határozzák meg, amelyek a logikai egység tervezőjét arra kényszerítik, hogy éppen olyan impedanciájú logikai egységet és éppen azt a feszültséget válassza. A logikai egység konstrukciója az aktív és passzív részek impedanciája között kapcsolatot határoz meg. Az impedancia nagysága pedig közvetlen kapcsolatban van a logikai egység egyik állapotból a másikba történő átváltásakor lejátszódó átmeneti jelenségek sebességével; minél nagyobb az impedancia, annál inkább lelassulnak az átmeneti jelenségek, ami azt jelenti hogy lecsökken az egység működési sebessége.

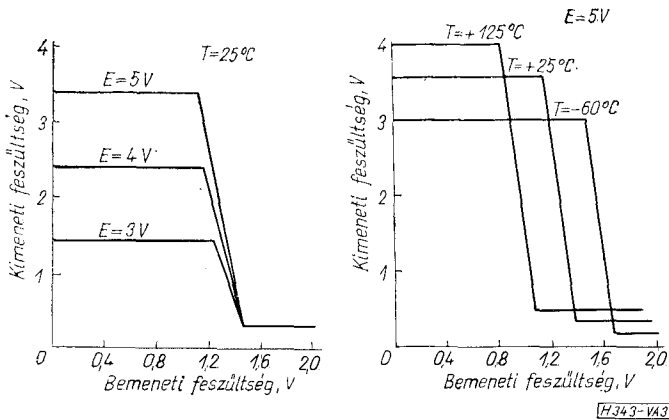
A tápfeszültség megválasztása a logikai egység megengedett paraméter tűrései és működési feltételei figyelembevételével, az egységre előírt zajtartalékok alapján történik.

Mivel az integrált áramkörökre megengedett hőmérséklettartomány szélessége majdnem  $200\text{ }^\circ\text{C}$  ( $-60\text{ }^\circ\text{C}$ -tól  $+125\text{ }^\circ\text{C}$ -ig terjed), a tápfeszültség értékére pedig  $\pm 5\%$  vagy  $\pm 10\%$  eltérés engedhető meg, feltételezve, hogy az áramköri elemek fizikai méretei, illetve a fizikai szerkezet paraméterei (adalék koncentráció stb.) maximálisan  $\pm 10\%$ -kal térnek el a névleges értéktől, az IC paraméterek és a működési feltételek szórása következtében meglehetősen nagy szórástartományú átviteli karakterisztika-családot kapunk (3. ábra).

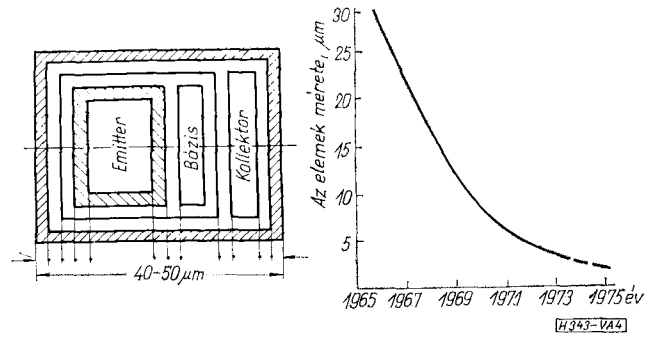
Első közelítésben azt mondhatjuk, hogy egy logikai egység kapcsolási idejét az egység  $RC$  időállandója határozza meg.

$$\tau_{\text{kapcs}} = RC$$

Ebből következik, hogy a mikroelektronikában a félvezető eszközök méreteinek csökkentése az adott műveleti teljesítménnyel (például számítógépeknél a hatékonyság, amely  $1\text{ s}$  alatt elvégezhető műveletek



3. ábra. Integrált áramkör átváltási karakterisztika család. Az átváltási karakterisztika változása a környezeti hőmérséklet változásának hatására



4. ábra. A szabványos raszterávolság fejlődése a félvezető technológiában

számából számítható) bíró elektronikus teljesítmény felvételének csökkenésével jár.

Képzeljük el, hogy az áramutak mentén felosztjuk a félvezető eszközt  $n$ -részeire úgy, hogy a tranzisztor átmeneteinek területe  $n$ -szer csökkenjen, miközben a többi méretek változatlanok maradnak. Ezáltal az átmenetek kapacitása  $n$ -ed részre csökken, és bár a logikai egység időállandója (vagyis a működési sebesség) változatlan marad, a teljesítményfelvétel  $n$ -ed részre csökken:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{V^2}{nR}$$

Így a mikroelektronika fejlődése az IC komponensek méretcsökkenésének irányában az adott funkcionális teljesítőképességgel rendelkező elektronikai áramkörök teljesítményfelvételének csökkenéséhez vezet.

Az adott IC technológiai színvonalra, és szabványosított tápfeszültségekre a

$$\tau_{\text{kapcs}} \cdot P = V^2 \cdot C$$

egyenlet azt mutatja, hogy a logikai egység kapacitásértéke állandó és egyenlő  $4\text{ pF}$  ( $Q=100\text{ pJ}$  esetében).

Ha a logikai egység fizikai szerkezetét képező  $p-n$  átmenetek átlagos fajlagos kapacitását  $250\text{ pF/mm}^2$ -nek fogadjuk el, az elem átmeneteinek felülete  $1,6 \cdot 10^{-2}\text{ mm}^2$ -re, lineáris méretei pedig  $1,3 \cdot 10^{-1}\text{ mm}$ -re adódnak. Így a logikai egységben egy tranzisztor által elfoglalt terület  $100 \times 100\text{ }\mu\text{m}^2$  körül lesz.

Feltételezve, hogy a maximális raszterszám a tranzisztor topológiáján eléri a  $10-20$ -at, azt kapjuk, hogy a raszterávolság értéke egyenlő lesz  $5-10\text{ }\mu\text{m}$ -rel (4. ábra).

Az integrált áramkörök merőben különböző tulajdonságokkal rendelkező területeit egymástól elválasztó lépéstávolság szokványos értéke állandó egy adott tömeggyártásban alkalmazott technológiai színvonalra. Az integrált áramkörök megmunkálási technológiájának fejlődése a szabványos raszter-ávolság értékének fokozatos csökkenésével jár. A „félvezető korszak” kezdetén a technológiai fejlődés folyamán mintegy  $100$ -szoros raszterávolság csökkenés ment végbe (4. ábra). A legnagyobb sebességű IC sorozatok technológiájánál a szabványos raszterávolság értéke  $2,5-5\text{ }\mu\text{m}$ ; a kidolgozandó technológiáknál pedig  $2\text{ }\mu\text{m}$ -nél kisebb raszterávolság gyakorlatilag a

fizikai felbontóképesség határán van, ami csak lát-  
ható fényben, precíziós fotografiai módszerekkel  
érhető el.  $1\ \mu\text{m}$ -nél kisebb szabványos rasztértá-  
volságot pedig valószínűleg csak elektronsugaras  
megmunkálással kaphatunk.

A mikroelektronikai eszközök méreteinek csökke-  
nése és az ezzel együttjáró átváltási frekvencianöve-  
kedés lehetővé tette, hogy mintegy  $10^{-9}$  s (1 ns) nagy-  
ságrendű kapcsolási időt érjünk el. Eddig 2–3 ns  
kapcsolási idejű félvezetőalapú integrált áramkörö-  
ket dolgoztak ki és kerültek a gyártásba.

### 1. melléklet

#### A TTL típusú IC sorozat funkcionális alapáramkörei

- „8 ÉS-NEM” kapu
- „4 ÉS-NEM” kettős kapu
- „3 ÉS-NEM” kapu hármas
- „2 ÉS-FEM” kapu négyes
- „4 ÉS-NEM” kettős kapu nagy kimeneti terhelhetőséggel
- „2—2 ÉS—2 VAGY—NEM” kettős kapu
- „2—2—2—3 ÉS—4 VAGY—NEM” kapu
- „4—4 ÉS—2 VAGY—NEM” kapu
- S—K tár
- Kettős D-tár
- D-tár négyes
- kettős 4-bemenetű „VAGY” típusú bővítő egység
- kettős 4-bemenetű „ÉS—NEM” típusú áramkör, nyitott kollektoros kimenettel és megnövelt kimeneti terhelhetőséggel (kijelző rendszerekhez)
- négy egybeépített 2-bemenetű „ÉS—NEM” típusú áramkör nyitott kollektoros kimenettel (ellenőrző rendszerekhez)
- decimális számlánc fázis-impulzus jelfeldolgozással
- kettes-tizes 4-bites számlánc
- 12-es számlánc — osztó
- kettős 4-bites számlánc
- kettes-tizes reverzív számlánc
- frekvencia osztó változtatható osztási együtthatóval
- 4-bites univerzális léptető tároló
- 1-bites teljes összeadó
- 2-bites teljes összeadó
- 4-bites teljes összeadó
- 2 címző bemenet meghajtó
- memória meghajtó: szorzó erősítő: null beállító áramkör stb.

#### Az ECL típusú, ultranagysebességű, számítástechnikai IC sorozat funkcionális alapáramkörei

- „VAGY/VAGY—NEM” négyszer kétbemenetű kapu
- „ÉS—NEM” négyszer kétbemenetű kapu
- „VAGY/VAGY—NEM” kapu hármas
- „VAGY—NEM” kapu hármas
- „VAGY/VAGY—NEM” kettős kapu
- „VAGY” kettős kapu nagyteljesítményű kimenettel
- „VAGY—NEM” kettős kapu nagyteljesítményű kimenettel
- „VAGY—ÉS/VAGY—ÉS—NEM” kettős kapu
- „VAGY—ÉS” kettős kapu
- „(3—3—3—4) VAGY—4 ÉS” kapu
- „(2—2) ÉS—2 VAGY) (2—2) ÉS—2 VAGY—NEM” kettős kapu
- „VAGY—ÉS/VAGY—ÉS—NEM” kapu
- összeadó hármas
- vonalvevő négyes
- vonalvevő hármas
- gyors továbbító áramkör
- kettős összeadó-számító egység
- kettős D-tár
- kettős tárkiolvasó
- D tár négyes
- négyszer 2-bemenetű D tár
- kettős S—K tár
- 3-bites dekódoló
- 8 csatornás multiplexer
- univerzális kettős számlánc
- univerzális decimális számlánc
- 12-es bemenetű paritás vizsgáló
- 4-bites aritmetikai egység
- 4-bites univerzális léptető tároló
- 64-bites memória véletlen hozzáférési memória
- 16-bites memória véletlen hozzáférési memória
- 4-bites memória asszociatív kiválasztással
- 256-bites PROM (programozható fix memória)
- 1024-bites PROM
- 64-bites operatív memória
- 256-bites operatív memória
- tranzisztor négyes TTL-ről ECL-re és ECL-ről TTL-re szintekkel
- vonalmeghajtó stb.