L 870

HÍRADÁS-TECHNIKA

A HÍRADÁS-TECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET LAPJA

11

XXI. ÉVFOLYAM, 11. SZÁM, 321—352. OLDAL, BUDAPEST, 1970. NOVEMBER HÓ

1970. november, XXI. évfolyam, 11. szám

HÍRADÁSTECHNIKA

A HÍRADÁSTECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET LAPJA

TARTALOM

20 éves a Távközlési Kutató Intézet 321
KOVÁCS ZSOLTNÉ—KOVÁCS ZSOLT: Optimalizálási eljárások 322
Szemle 335, 338
Új célok, új utak a tudományos minősítésben 336
DR. KATONA JÁNOS: Vékony mágneses rétegekkel működő memóriák kutatása 339
BARTA ERZSÉBET: Diffundáltatott Si-minták infravörös sugárzással történő vizsgálatáról 343
Nemzetközi Szimpózium az elektromágneses térelméletről 346
DR. AMBRÓZY ANDRÁS: Térvezérlésű tranzisztorok vezérlőelektróda árama 347
Tartalmi összefoglalások 350
Обобщения 351
Zusammenfassungen 351
Summaires 352
Résumés 352

Szerkesztőség: BOGLÁR GYULA főszerkesztő, SZÖLLŐSI GYÖRGYNÉ szerkesztőségi titkár, BALOGH PÁL, DR. SÁRKÖZI GÉZA kandidátus és MAY PÉTER tudományos szerkesztők, DR. FLESCH ISTVÁN, DR. RUPPENTHAL PÉTER szerkesztőségi munkatársak. — A szerkesztőség címe: Budapest, II., Mártírok útja 85. I. 139. Telefon: 183-772 — A Híradástechnikai Tudományos Egyesület címe: Budapest, V., Szabadság tér 17. Telefon: 113-027

INDEX: 25.375

Szerkesztő bizottság tagjai: ALMÁSSY GYÖRGY a műszaki tudományok doktora, BARTA ISTVÁN akadémikus, BATTISTIG GYÖRGY, BÍRÓ FERENC, BUDAI LAJOS, CZEGLÉDY GYÖRGY, ERDÉLYI JÁNOS kandidátus, GIBER JÁNOS kandidátus, KATONA JÁNOS, a műszaki tudományok doktora, KŐMŰVES FRIGYES kandidátus, LAJKÓ SÁNDOR, MAGÓ KÁLMÁN, MAKÓ ZOLTÁN, NÁDAS TIBOR, POGÁNY KÁROLY, VALKÓ I. PÉTER, a műszaki tudományok doktora, VÍG ISTVÁN

HÍRADÁSTECHNIKA

Kiadja a Lapkiadó Vállalat Budapest, VII., Lenin körút 9—11. Telefon 221-285. Felelős kiadó: SALA SÁNDOR igazgató. Terjeszti a Magyar Posta. Előfizethető a Posta Központi Hírlapirodánál (Budapest, V., József nádor tér 1. Telefon: 180-850) vagy bármely postahivatalnál. Előfizetési díj: félévre 36 Ft, egész évre 72 Ft. Egyes szám ára: 6 Ft. Megjelenik havonta. Csekkszámlaszám: egyéni 61,254, kerületi 61,066 vagy átutalás MNB 8. sz. folyószámlájára. A folyóirat külföldre előfizethető: „KUTURA" P. O. B. 149 Budapest, 62.

70.5069 Egyetemi Nyomda, Budapest. Felelős vezető: JANKA GYULA igazgató

HÍRADÁSTECHNIKA

A HÍRADÁSTECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET LAPJA

20 éves a TKI

A magyar híradástechnikai ipar egyik legjelentősebb bázisa, a Távközlési Kutató Intézet idén ünnepli 20 éves fennállását. Alapítása egybeesik az önálló magyar híradástechnikai alapkutatás és berendezésfejlesztés megindulásával.

A TKI alakulásakor viszonylag kis intézmény volt, azóta naggyá fejlődött nemcsak méreteit, hanem eredményeit tekintve is. Az elmúlt két évtizedben a TKI-ban számos alapanyag és alkatrész kutatási és fejlesztési munkát fejeztek be eredményesen. Jól értékesíthető, világszínvonalú műszereket és nagyberendezéseket fejlesztettek ki. Igen intenzív és eredményes munkát folytatnak a rendszerelmélet, rendszertechnika és a híradástechnikai elméleti tudományok terén.

A TKI munkatársai mind belföldi, mind jelentős külföldi szaklapokban rendszeresen publikálnak, így lapunk sok cikkét is a TKI-ban írták. Szakkönyvek, tankönyvek, disszertációk szerzőiként az intézet dolgozói kimagasló műveket alkottak. Mindig nagy nemzetközi érdeklődést keltenek és sikert aratnak a TKI kutatóinak beszámolói a négyévenként megrendezésre kerülő Mikrohullámú Összeköttetések Kollokviumon.

Október 29-én és 30-án a Távközlési Kutató Intézet ünnepi tudományos ülésszakkal emlékezett meg a húszéves évfordulóról. A rendezvényt Asztalos Lajos kohó- és gépipari miniszterhelyettes nyitotta meg. Előadásában ismertette a híradástechnikai ipar és ezen belül a TKI népgazdasági jelentőségét, méltatta az elért eredményeket, röviden szólt azokról a határozatokról, melyek a fejlődés útját és a jövő feladatait jelölik meg. Dr. Váradi Imre, a TKI igazgatója az intézet jelenéről és a soron levő feladatokról beszélt. Továbbiakban számos, igen nagy érdeklődéssel kísért előadás hangzott el. Az ülésszak teljes anyaga könyvalakban a jövő évben kiadásra kerül, de néhány előadás témájáról lapunkban is jelenik meg cikk.

Szeretettel köszöntjük a 20 éves Távközlési Kutató Intézetet, annak minden dolgozóját és további sok sikert kívánunk munkájukhoz.

Szerkesztőség

KOVÁCS ZSOLTNÉ – KOVÁCS ZSOLT
Távközlési Kutató Intézet

Optimalizálási eljárások

ETO: 65.012.2:681.3.06

Optimalizáláson a tervezésnek azt a szakaszát értjük, amelyben az előírt funkciót legjobban ellátó rendszer felépítése már adott, és a feladat e felépítést meghatározó paraméterek legkedvezőbb értékeinek megkeresése.

Az optimalizálási feladat egyértelmű kitűzéséhez szükséges, hogy a paramétertéren értelmezve legyen olyan függvény, amellyel eldönthető, hogy a paramétertér két pontja közül melyik a jobb. Ennek megfelelően az optimális megoldás megkeresése ekvivalens e függvény minimumának (maximumának) megkeresésével. Az egyöntetűség kedvéért a továbbiakban minimumkeresésről beszélünk.

A minimalizálást általában kényszerfeltételek mellett kell végrehajtani. A feltételi relációk pl. realizálhatósági követelményekből adódhatnak.

Kényszerfeltétel melletti minimalizálással két speciális esetben — lineáris célfüggvény, lineáris kényszerfeltételek, ill. kvadratikus célfüggvény, lineáris kényszerfeltételek – kiterjedt irodalom (lineáris programozás, kvadratikus programozás) foglalkozik.

Az alábbiakban lényegében kényszerfeltétel nélküli minimumkeresési eljárásokkal fogunk foglalkozni, megjegyezzük azonban, hogy az érintett módszerek közül az ún. kereső (search) módszerek általános kényszerfeltételek mellett is alkalmazhatók.

Az ismertetett eljárások egy részével kísérleteket végeztünk GIER számítógépen különböző próbafüggvények mellett (l. 7. szakasz). A felhasznált — nagyrészt általunk fejlesztett — GIER ALGOL 4 programok a TKI programkönyvtárában találhatók (PROC RK, PROC NONLINEARSYSTEM, PROC PATTERN SEARCH, PROC ROSENBROCK, PROC SZIMPLEX, PROC GRADIENS, PROC LINPRO).

1. Minimumkeresési eljárások

1.1. A módszerek osztályozása

Az optimális tervezés feladata az előbbiek szerint többváltozós függvény minimumának meghatározására vezethető vissza. Pontosabban: keressük azt az **x*** vektort, amelyre

$$f(\mathbf{x}^*) = \min f(\mathbf{x}), \qquad \mathbf{x} \in X$$

ahol $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \ldots x_n)$ az n dimenziós paraméter egy pontja, X a paramétertér egy tartománya: $\mathbf{x} \in X$, ha $l_i \leq x_i \leq u_i$ $i=1, 2, \ldots n$ és **l**, **u** rögzített. (A minimumkeresést zárt tartományra korlátozzuk, azonban e feltétel könnyű kezelhetősége miatt a feladatot továbbra is kényszerfeltétel nélkülinek tekintjük.) $f(\mathbf{x})$ X-en értelmezett tetszőleges egyértékű függvény, a továbbiakban hibafüggvénynek fogjuk nevezni.

Közismert példák hibafüggvényekre:

Legkisebb négyzetes hiba

$$f(\mathbf{x}) = \Sigma w(\omega_i)(K(\omega_i) - F(\omega_i, \mathbf{x}))^2.$$

Csebisev-értelemben vett hiba

$$f(\mathbf{x}) = \max_{\omega_i} | w(\omega_i)(K(\omega_i) - F(\omega_i, \mathbf{x}))|,$$

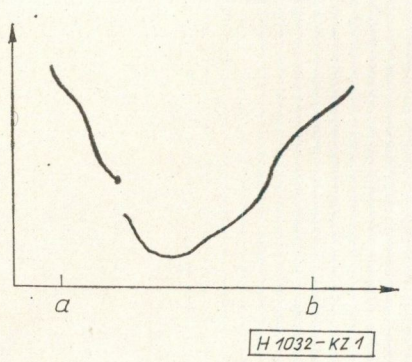
ahol $F(\omega, \mathbf{x})$ a modellt valamilyen értelemben jellemző, X-en definiált függvény ω független változóval; $K(\omega)$ követelmény függvény; $w(\omega)$ súlyfüggvény. Mindkét esetben a diszkrét változattal a számítógép orientáltságot kívántuk hangsúlyozni.

A minimumkereső eljárások lényege: X-en valamilyen terv szerint kijelölt pontokban (próbapontokban) f értékének megvizsgálása. Eltekintve a már említett kényszerfeltételek szerinti osztályozástól, szokás a minimumkereső eljárásokat aszerint osztályozni, hogy a próbapontok kijelölése független-e előző próbapontoktól, vagy nem (szimultán, ill. szekvenciális módszerek). Másik lehetséges csoportosítási szempont: vannak-e olyan függvényosztályok, amelyekre az eljárás konvergenciája bizonyított (analitikus, ill. heurisztikus módszerek).

Jelen áttekintésünkben főleg az a szempont fog érvényesülni, hogy deriválható-e $f(\mathbf{x})$ X-en.

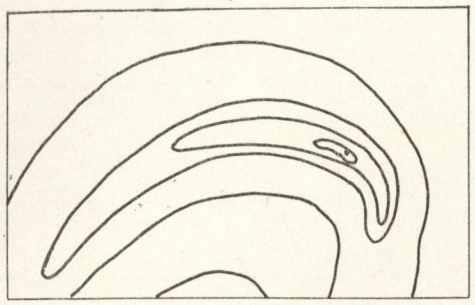
1.2. Unimodalitás

Az $f(x)$ egyváltozós függvény unimodális az $[a, b]$ intervallumban, ha van olyan $x^* \in [a, b]$, amelyre $f(x)$ szigorúan csökkenő $[a, x^*]$-ban és szigorúan, növekvő $[x^*, b]$-ben. Vagy szigorúan csökkenő $[a, x^*]$-ban és szigorúan növekvő $[a^*, b]$-ben. Kiemeljük, hogy az unimodalitás sem folytonosságot, sem deriválhatóságot nem követel meg.

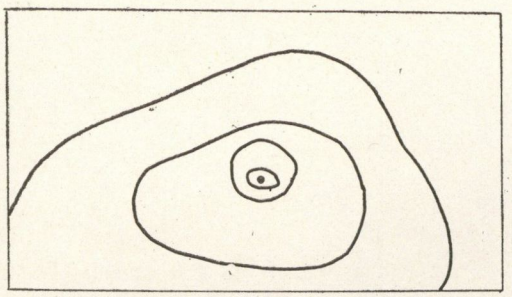


1. ábra. Egyváltozós unimodális függvény

Beérkezett: 1970. V. 3-án.



2. ábra. Kétváltozós unimodális függvény szintvonalai (tetszőleges pontpár összeköthető minimum helyen áthaladó unimodális úttal)



3. ábra. Kétváltozós szigorúan unimodális függvény szintvonalai (a minimum helyből kiinduló egyenesek mentén a függvény szigorúan monoton növekvő)

Többváltozós esetben: $f(\mathbf{x})$ unimodális X-en ha létezik olyan $\mathbf{x}^*$, hogy minden $\mathbf{x}\in X$-re $f(\mathbf{x}^*)<f(\mathbf{x})$, $\mathbf{x}^*\in X$, $\mathbf{x}^*\neq\mathbf{x}$, továbbá ha minden $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2\in X$, $\mathbf{x}_1\neq\mathbf{x}^*$, $\mathbf{x}_2\neq\mathbf{x}^*$ pontpárhoz megadható olyan $\mathbf{x}^*$-on átmenő $\mathbf{x}(\lambda)\in X$ út, amelyen $f\mathbf{x}(\lambda)=f(\lambda)$ unimodális.

$f(\mathbf{x})$ szigorúan unimodális X-en, ha minden $\mathbf{x}_0\in X$-re $f(\mathbf{x})$ az $\overline{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}^*}$ egyenes mentén szigorúan csökkenő. Ha $f(\mathbf{x})$ unimodális a minimumkereső eljárások tetszőlegesen megközelíthetik az egyetlen minimumhelyet. A gyakorlatban általánosabb — multimodális — esetben minden minimumkereső eljárás lokális minimumba fut. Ez esetben az eljárás többszöri ismétlésével, és az egyes minimumhelyek összehasonlításával kísérelhetjük meg az abszolút minimum kiválasztását.

2. Klasszikus módszer

A differenciál számításból jól ismert, hogy az $f(\mathbf{x})$ kétszeresen deriválható többváltozós függvénynek lokális minimuma van az $\mathbf{x}^*$ helyen, ha az elsőrendű parciális deriváltak zérussal egyenlők és a másodrendű parciális deriváltakból képzett ún. Hess-féle mátrix pozitív definit az $\mathbf{x}^*$ helyen. Vagyis megoldandó az

$$f'_{xi}(\mathbf{x})=0 \qquad i=1, 2,\ldots n$$

nemlineáris egyenletrendszer, majd eldöntendő a

$$H_{i,j}=\left[\frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j}\right]$$

mátrixról, hogy pozitív definit-e a megoldás vektor helyén. $g_i(\mathbf{x})=0$ alakú kényszerfeltételek esetén az előbbiek $\varphi(\mathbf{x})=f(\mathbf{x})+\sum_i \lambda_i g_i(\mathbf{x})$-re alkalmazandók (Lagrange-elv). Végeredményben a központi feladat nemlineáris egyenletrendszer megoldása. Az ismertebb gyökkereső eljárásokat közösen jellemzi, hogy általában csak közelről konvergensek és emiatt — tervezéssel kapcsolatos minimalizálási feladatok esetén — többnyire nem alkalmazhatók.

Egyetlen gyökkereső eljárásra térünk csak ki ezen a helyen: Davidenko módszerére. Ezzel az eljárással jó kiindulási értékeket lehet nyerni gyorsan konvergáló iterációs módszerekhez (pl. általánosított Newton-Raphson-módszer).

Az eljárás [1] röviden a következő:

Megoldandó az $\mathbf{f}(\mathbf{x})=0$ egyenletrendszer az alábbi feltételek mellett:

1. $f_i(\mathbf{x})$ továbbá $\dfrac{\partial f_i(\mathbf{x})}{\partial x_j}$ $i, j=1, 2,\ldots n$ létezik és folytonos X-en.

2. $J_{ij}=\left|\dfrac{\partial f_i(\mathbf{x})}{\partial x_j}\right|$ Jakobi-féle determináns minden $\mathbf{x}\in X$-re zérustól különböző.

3. $\mathbf{f}(\mathbf{x})=0$-nak van legalább egy megoldása X-ben. A λ valós paraméter bevezetésével transzformáljuk a kiindulási egyenletrendszert oly módon, hogy az

$$\mathbf{f}^*(\mathbf{x}, \lambda)=0$$

transzformált egyenletrendszer $\lambda=\lambda_0$ mellett könnyen megoldható legyen, és $\lambda=\lambda_N$ mellett fennálljon

$$\mathbf{f}^*(\mathbf{x}, \lambda)\equiv\mathbf{f}(\mathbf{x}).$$

A transzformált egyenletrendszerre megköveteljük a λ-val bővített $n+1$ dimenziós X^* tartományban az 1—3 alatti feltételek teljesülését.

$\mathbf{f}^*(\mathbf{x}, \lambda)$-t λ szerint deriválva közönséges elsőrendű lineáris differenciál egyenletrendszert nyerünk $\mathbf{x}(\lambda)$-ra:

$$J^*\frac{d\mathbf{x}}{d\lambda}+\frac{\partial \mathbf{f}^*}{\partial \lambda}=0$$

ahol

$$J^*_{i,j}=\left[\frac{\partial f_i^*(\mathbf{x}, \lambda)}{\partial x_j}\right].$$

A kapott differenciál egyenletrendszert $\mathbf{x}(\lambda_0)$ ismeretében pl. Runge-Kutta módszerrel integrálhatjuk $[\lambda_0, \lambda_N]$-on. Általában $\lambda_0=0$, $\lambda_N=1$ a szokásos választás.

Példa

Oldjuk meg az

$$x_1-e^{\sin x_2}=0,$$

$$\pi e^{\sin \pi x_1}+x_2=0$$

egyenletrendszert.

Transzformáljuk az alábbi módon:

$$x_1-\lambda e^{\sin x_2}=0$$

$$\pi e^{\sin \pi x_1}+x_2=0.$$

$\lambda=0$-ra a megoldás: $x_1=0$, $x_2=-\pi$.

A megoldandó differenciál egyenletrendszer:

$$\begin{bmatrix} 1 & -\lambda \cos x_2 e^{\sin x_2} \\ \pi^2 \cos \pi x_1 e^{\sin \pi x_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{d\lambda} \\ \frac{dx_2}{d\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -e^{\sin x_2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

amiből

$$\frac{dx_1}{d\lambda} = \frac{e^{\sin x_2}}{1+\lambda\pi^2 \cos x_2 \cos \pi x_1 e^{\sin \pi x_1 + \sin x_2}}$$

$$\frac{dx_2}{d\lambda} = \frac{-\pi^2 \cos \pi x_1 e^{\sin \pi x_1 + \sin x_2}}{1+\lambda\pi^2 \cos x_2 \cos \pi x_1 e^{\sin \pi x_1 + \sin x_2}}$$

Ezt a differenciál egyenletrendszert 10^{-6} pontossági igény mellett ötödrendű Runge-Kutta-eljárással (TKI programkönyvtár PROC RK) GIER számítógépen 2,8 perc alatt megoldottuk:

gyökök	helyettesítési értékek nagyságrendje
$x_1 = 0{,}3678953$	$f_1(x_1, x_2) \approx 10^{-9}$
$x_2 = -7{,}844702$	$f_2(x_1, x_2) \approx 10^{-7}$

Összehasonlításképpen [1]-ből: a differenciál egyenletrendszert $\Delta\lambda = 0{,}01$ lépésköz mellett Adams-Störmer-módszerrel integrálva (Siemens 2002 számítógépen, 3 perc futási idő alatt) a gyökökre $x_1 = 0{,}525157173$, $x_2 = -8{,}569421666$ értékek adódnak, majd általánosított Newton-módszerrel finomítva ezeket (további 14 mp futási idő alatt) a végeredmény:

gyökök	helyettesítési értékek nagyságrendje
$x_1 = 0{,}3678952793$	$f_1(x_1, x_2) \approx 10^{-10}$
$x_2 = -7{,}844702446$	$f_2(x_1, x_2) \approx 10^{-9}$

3. Kereső módszerek

Kereső (search) módszereknek fogjuk nevezni azokat a heurisztikus minimumkereső eljárásokat, amelyek a hibafüggvény deriváltjait nem használják.

3.1. Véletlenszerű keresés

A véletlenszerű keresés (random search) — hasonlóan a rácsmódszerhez — szimultán módszer. A próbapontokat véletlenszerűen jelöljük ki az X paraméter tartományban, egyenletes eloszlású álvéletlen számok generálásával az egyes koordináta intervallumokban. Egyenletes eloszlású álvéletlen számok generálására legelterjedtebb a multiplikatív kongruenciális módszer:

$$r_{k+1} = r_k \cdot A \mod B$$

ahol r_k, r_{k+1} a k-ik ill. $k+1$-ik véletlen szám és A, B számítógéptől függő, alkalmas konstansok.)

Annak valószínűsége, hogy próbapont előre kijelölt résztartományba (pl. a minimumhely bizonyos környezetébe) essék arányos a résztartomány nagyságával. Ha ez d-ed része X-nek és $p(d, k)$ annak valószínűsége, hogy k kísérletből legalább egy odaessen, úgy

$$p(d, k) = 1-(1-d)^k \qquad d<1.$$

$p(d, k)$ függetlensége a paraméter tartomány dimenzószámától meglepőnek tűnhet, de míg egydimenziós esetben a d-ed rész az egyetlen koordinátában jelent $100d\%$ bizonytalanságot, addig n dimenzióban ez az egyes koordinátákban $100d^{1/n}\%$ bizonytalanságot jelent. A próbapontok minimális száma ahhoz, hogy p valószínűséggel legalább egy kísérlet a paraméter tartomány d-ed részébe essék [28] az 1. táblázatban van megadva.

1. táblázat

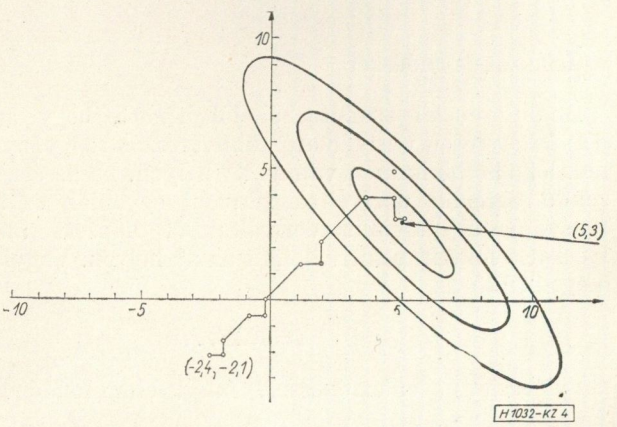
d	$p(d, k)$			
	0,80	0,90	0,95	0,99
0,1	16	22	29	44
0,05	32	45	59	90
0,025	64	91	119	182
0,01	161	230	299	459
0,005	322	460	598	919

3.2 Irányított keresés (pattern search)

Egyik legegyszerűbb minimalizálási technika. Alapja az ún. relaxációs módszer [32], [4], amelynek során egyszerre csak egy koordináta értékét változtatjuk. Egy iterációs lépés akkor fejeződik be, ha minden koordináta tengely mentén tettünk egy-egy lépést a hibafüggvény csökkenésének irányában.

A módszernek több változata ismeretes; ezek az iterációnkénti koordináta irányok sorrendjének — valamint az egyes lépéshosszak nagyságának megválasztásában különböznek.

Az irányított keresés abban tér el az előbbi módszertől, hogy a relaxációs iteráció (search lépés) befejezése után még egy lépést tesz a megkezdett irányban. A módszer alábbi—[30]-at alapul vevő— leírása megfelel a TKI programkönyvtár PROC PATTERN SEARCH azonosítójú eljárásának.



4. ábra. $f(x_1, x_2) = 17(x_1-5)^2 + 17(x_2-3)^2 + 30(x_1-5)(x_2-3)$ minimumának keresése az „irányított keresés" módszerével (Az ábra PROC PATTERN SEARCH felhasználásával készült)

A) „search lépés"

A pillanatnyi $\mathbf{x}_0$ kiindulási pontból szukcesszív lépéssorozattal (lépésenként csak egy koordinátát változtatva) jutunk az $\mathbf{x}_0$ pontba:

$$\begin{pmatrix} x_{1,1} \\ x_{1,2} \\ \vdots \\ x_{1,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{0,1} \\ x_{0,2} \\ \vdots \\ x_{0,n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathrm{d}x_{0,1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \mathrm{d}x_{0,2} \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \ldots + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \mathrm{d}x_{0,n} \end{pmatrix}$$

A lépésköz automatikusan változik. Ha bármely tengely mentén az elmozdulás nagyobb függvényértékhez vezetne, akkor ezt megismételjük az eredeti kiindulási pontból a lépésköz $-\beta$-szorosával. Ezt ismételjük mindaddig, amíg a lépésköz kisebb nem lesz egy előírt határnál, vagy amíg egy lépés során kisebb függvényértékhez nem jutunk. A következő search lépésnél $\alpha \cdot \mathrm{d}x_i$ lesz az induló lépésköz az i-ik koordináta tengely mentén ($i=1, 2, \ldots n$). A konstansok egy lehetséges választása: $\alpha=1{,}5$, $\beta=0{,}5$

B) „pattern lépés"

Mindig search lépés után következik, a koordinátákat egyszerre változtatja meg. Az előbbi $\mathbf{x}_1$ pontból kiindulva pl.

$$\begin{pmatrix} x_{2,1} \\ x_{2,2} \\ \vdots \\ x_{2,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{1,1} \\ x_{1,2} \\ \vdots \\ x_{1,n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_1(x_{1,1}-x_{0,1}) \\ \gamma_2(x_{1,2}-x_{0,2}) \\ \vdots \\ \gamma_n(x_{1,n}-x_{0,n}) \end{pmatrix}$$

ahol $\gamma_i = \begin{cases} 2, & \text{ha az } i\text{-ik koordináta tengely mentén két egymásutáni search lépésben az elmozdulás azonos irányú volt,} \\ 1 & \text{különben.} \end{cases}$

Ha a pattern lépés nem vezetne kisebb függvényértékű helyre semmisnek tekintődik, és az eljárás search lépéssel kezdődik elölről.

Az eljárás addig folytatódik, amíg a pontosságra kirótt feltétel nem teljesül ($\mathrm{d}x_i < \varepsilon_i$ minden i-re), vagy amíg az iterációk száma a megengedettet meg nem haladja.

Az eljárás tesztelésével kapcsolatban megjegyezzük, hogy pl. Rosenbrock próbafüggvényén (l. 8-ik szakasz) az éles, görbült völgy követésére gyakorlatilag képtelen volt.

3.3 Rosenbrock módszere

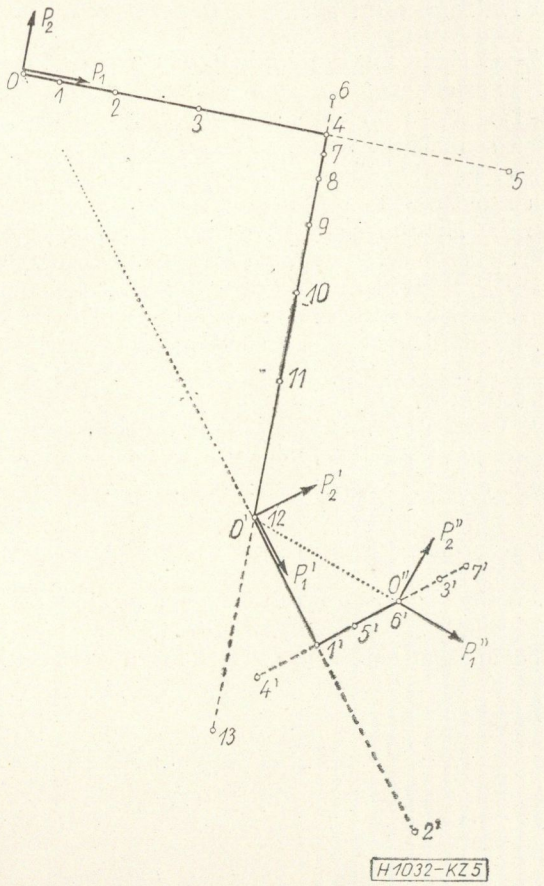
Az eljárás az irányított keresés változata. A módosítás lényege: koordináta transzformáció iterációnként, amelynek eredményeképpen egyik koordináta tengely mindig a legutóbbi elmozdulás irányába kerül.

A koordináta transzformáció lényeges következménye, hogy

— az eljárás kanyargó völgyekben is képes előre haladni, és

— a koordináták közötti kölcsönhatás csökken.

A következőkben — Wood nyomán [6] az algoritmus rövid leírását adjuk.

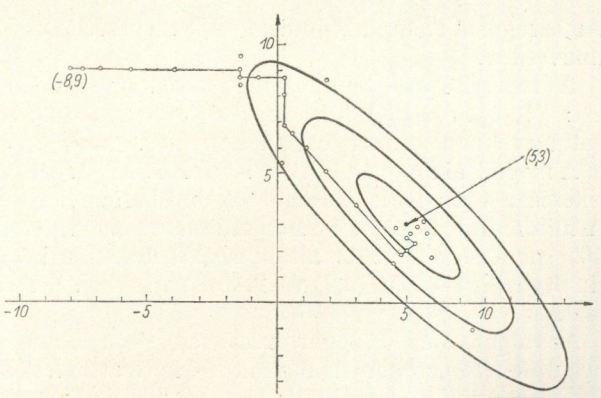


5. ábra. A Rosenbrock-féle eljárás haladási stratégiájának és koordináta transzformációjának illusztrálása kétváltozós esetben

Jelölje az eredeti (kiindulási) koordináta rendszer egységvektorait $\mathbf{Q}_i$, ill. a pillanatnyi koordináta rendszerét $\mathbf{P}_i$, $i=1, 2, \ldots n$.

$$\mathbf{P}_1 = a_{11}\mathbf{Q}_1 + a_{12}\mathbf{Q}_2 + \ldots a_{1n}\mathbf{Q}_n$$
$$\mathbf{P}_2 = a_{21}\mathbf{Q}_1 + a_{22}\mathbf{Q}_2 + \ldots a_{2n}\mathbf{Q}_n$$
$$\vdots$$
$$\mathbf{P}_n = a_{n1}\mathbf{Q}_1 + a_{n2}\mathbf{Q}_2 + \ldots a_{nn}\mathbf{Q}_n$$

($\mathbf{P}_i$ iránykoszínuszai: $a_{i1}, a_{i2}, \ldots a_{in}$)



6. ábra. $f(x_1, x_2) = 17(x_1-5)^2 + 17(x_2-3)^2 + 30(x_1-5)(x_2-3)$ minimumának keresése Rosenbrock módszerével. (Az ábra PROC ROSENBROCK felhasználásával készült)

A) Haladási stratégia

δ_i-vel lépünk a $\mathbf{P}_i$ irányban. Ha a lépés jó, folytatjuk az elmozdulást egyre növekvő ($\alpha\cdot\delta_i$, $\alpha^2\delta_i$, ...; $\alpha>1$) lépésekkel az első rossz lépésig, amit természetesen semmisnek tekintünk. Ha az első lépés rossz $-\beta\delta_i$ lépéssel próbálkozunk. A lépegetést a P_i irányban mindenképpen addig folytatjuk, amíg jó lépés — rossz lépés átmenet következik be, ill. a lépésköz előírt küszöb érték alá nem csökken. Ebben az esetben a P_i irányban nem mozdulunk el. A konstansok egy lehetséges választása: $\alpha=1{,}5$, $\beta=0{,}5$.

Az eljárást minden tengely mentén végrehajtjuk ($\mathbf{P}_i$, $i=1, 2, \ldots n$) mindig az előző irány mentén elért pontból kiindulva.

A $\mathbf{P}_i$ mentén tett δ_i lépés az eredeti koordináta rendszerben természetesen minden tengely mentén jelent elmozdulást (rendre: $a_{i1}\,\delta_i$, $a_{i2}\,\delta_i$, $a_{in}\,\delta_i$).

B) Koordináta transzformáció

Jelölje d_i a $\mathbf{P}_i$ irányban összesen megtett távolságot ($i=1, 2 \ldots n$), ill. d_i^0 a d_1, $d_2 \ldots d_n$ sorozat csökkenő abszolút értékek szerinti átrendezésének i-ik elemét.

Képezzük a

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_1&=d_1^0\mathbf{P}_1^0+d_2^0\mathbf{P}_2^0+\ldots d_n^0\mathbf{P}_n^0\\ \mathbf{A}_2&=\quad\ d_2^0\mathbf{P}_2^0+\ldots d_n^0\mathbf{P}_n^0\\ &\vdots\\ \mathbf{A}_n&=\qquad\qquad\ d_n^0\mathbf{P}_n^0\end{aligned}$$

vektorokat, ahol $\mathbf{P}_i^0$ a d_i^0-nek megfelelő egységvektort jelenti.

Ezek után a Gram—Schmidt-féle eljárással ortonormáljuk az $\mathbf{A}_i$ vektor rendszert:

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_1&=\mathbf{A}_1\\ \mathbf{P}_1^1&=\mathbf{B}_1/|\mathbf{B}_1|\\ \mathbf{B}_2&=\mathbf{A}_2-(\mathbf{A}_2\mathbf{P}_1^1)\mathbf{P}_1^1\\ \mathbf{P}_2&=\mathbf{B}_2/|\mathbf{B}_2|\\ &\vdots\\ \mathbf{B}_k&=\mathbf{A}_k-\sum_{j=1}^{k=1}(\mathbf{A}_k\mathbf{P}_j^1)\mathbf{P}_j^1\\ \mathbf{P}_k&=\mathbf{B}_k/|\mathbf{B}_k|\end{aligned}$$

Az ortogonalizálást a k indexig folytatjuk, ha $\mathbf{A}_{k+1}$ nullvektor.

A transzformált koordináta rendszer egységvektorai: $\mathbf{P}_1^1$, $\mathbf{P}_2^1$, ... $\mathbf{P}_n^1$.) A következő elmozdulás sorozatot ezekben az irányokban hajtjuk végre.)

A megfelelő algol eljárást (PROC ROSENBROCK) sikeresen teszteltük Rosenbrock próbafüggvényén. A minimumhelyet (1,1) minden esetben megtalálta: 10^{-6} pontosság mellett általában 40 iteráción belül (indítva pl. (−8,8), (4,4) (−2,10) pontokból, l. 8-ik szakasz.)

Az algoritmus központi részének — a Gram—Schmidt-féle ortogonalizálásnak — keresztülvitelére Wood formuláit használtuk fel. Az eljárás fejleszthetőségét illetően megjegyezzük, hogy a Powell által leírt ortogonalizálási módszer [7] műveletigényessége n^2-tel arányos, míg az előbbié n^3-nel.

3.4 Simplex módszer

A módszer [8, 30, 31] jellegzetessége, hogy n dimenzió esetén $n+1$ pontot kezel egyidejűleg, iterációnként lecserélve a „legrosszabb" pontot néhány egyszerű, geometriailag jól érzékelhető művelettel.

Az eljárás leírásánál a következő jelöléseket használjuk:

$\mathbf{x}_i=(x_{i1}, x_{i2}, \ldots x_{in})$ $\mathbf{x}_i\in X$ a szimplex i-ik pontja, $i=1,2, \ldots n+1$,

$y_i=f(\mathbf{x}_i)$

$\mathbf{x}_w$ a „legrosszabb pont": $y_w\geq y_i$ minden i-re,

$\mathbf{x}_{w2}$ a „második legrosszabb pont": $y_{w2}\geq y_i$ $i\neq w$, $i=1, 2, \ldots n+1$,

$\mathbf{x}_b$ a „legjobb pont" $y_b\leq y_i$, minden i-re,

$\mathbf{x}_0=\dfrac{\sum_{i\neq w}\mathbf{x}_i}{n}$ a legrosszabb pont elhagyásával a pontok súlypontja,

$\overline{\mathbf{x}_i\mathbf{x}_j}$ az $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{x}_j$ pontok távolsága.

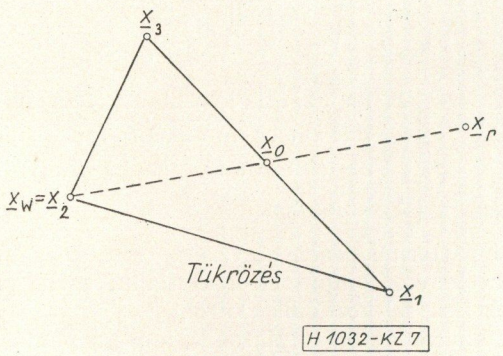
Négy alaplépés van: tükrözés, nyújtás, összehúzás, zsugorítás.

Első lépés: *tükrözzük* $\mathbf{x}_w$-t $\mathbf{x}_0$-ra. Jelöljük a tükrözött pontot $\mathbf{x}_r$-el:

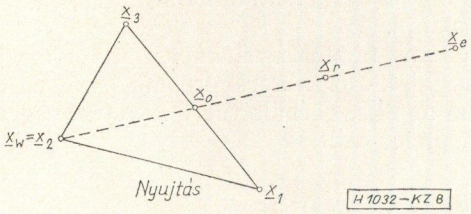
$$\mathbf{x}_r=\mathbf{x}_w+(1+m_r)(\mathbf{x}_0-\mathbf{x}_w)$$

(m_r tükrözési együttható)

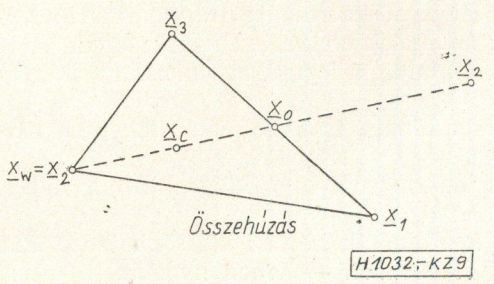
$$\overline{\mathbf{x}_0\mathbf{x}_r}=m_r\overline{\mathbf{x}_w\mathbf{x}_0}.$$



7. ábra



8. ábra



9. ábra

Ha $y_r < y_b$ a következő lépés *nyújtás:*

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x}_w + (1+m_e)(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_w)$$

(m_e nyújtási együttható)

$$\overline{\mathbf{x}_0\mathbf{x}_e} = m_e\overline{\mathbf{x}_w\mathbf{x}_0}$$

Ha $y_e < y_b$, $\mathbf{x}_w$-t $\mathbf{x}_e$-vel helyettesítjük, és az eljárás előről kezdődik. Különben $\mathbf{x}_r$ helyettesíti $\mathbf{x}_w$-t. Ugyancsak $\mathbf{x}_r$ helyettesíti $\mathbf{x}_w$-t, ha a tükrözés után

$$y_b \leq y_r < y_{w2}$$

$y_r \geq y_{w2}$ esetben az eljárás összehúzást kísérel meg:

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{x}_0 + m_c(\mathbf{x}_w - \mathbf{x}_0)$$

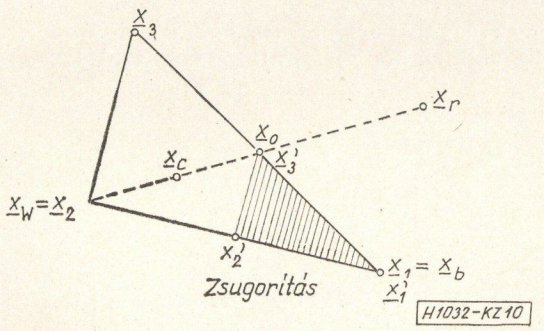
(m_c összehúzási tényező)

$$\overline{\mathbf{x}_0\mathbf{x}_c} = m_c\overline{\mathbf{x}_0\mathbf{x}_w}.$$

Ha $y_c < y_{w2}$, $\mathbf{x}_w$-t $\mathbf{x}_c$-vel helyettesítjük és az eljárás elölről kezdődik. Ellenkező esetben $\mathbf{x}_w$-nek definiáljuk $\mathbf{x}_w$ és $\mathbf{x}_c$ közül a „jobbat" és a szimplex tartományt a legjobb pont közül *zsugorítjuk:*

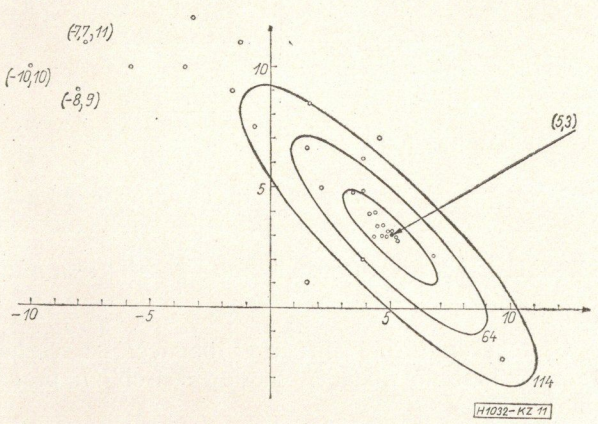
$$\mathbf{x}'_i = \frac{\mathbf{x}_i + \mathbf{x}_b}{2} \qquad i = 1, 2, \ldots n+1$$

és az eljárás elöről kezdődik.



10. ábra

A koefficiensek értékére $m_r = 1$, $m_e = 2$, $m_c = \frac{1}{2}$, választás bizonyult a legjobbnak, $m_r = 1/2, 2/3, 1$, $m_e = 2, 3, 4$, $m_c = 1/4, 1/3, 1/2$ lehetséges kombinációi közül Rosenbrock, Powell, Fletcher—Powell-féle próbafüggvényeken [8]. Az eljárást (PROC SIMPLEX) több tervezési feladatban sikerrel alkalmaztuk. Hatékonyságára jellemző, hogy képes követni Rosenbrock próbafüggvényén a kritikus völgyet, és kísérleteink szerint a minimumhelyet távoli kezdőpontokból indítva is mindig megtalálta [pl. (−8,8,) (−9,10), (−10,7.5)-ből indítva 75 iteráción belül 10^{-11} pontossággal. (A próbafüggvényeket és további teszteket illetően a 8-ik szakaszra utalunk.)



11. ábra. $f(x_1, x_2) = 17(x_1-5)^2 + 17(x_2-3)^2 + 30(x_1-5)(x_2-3)$ minimumának keresése szimplex módszerrel. (Az ábra PROC SZIMPLEX felhasználásával készült)

Az eljárás természetéből folyó néhány következmény:

— szimplex „amőba"-szerű mozgása miatt az eljárás kevésbé érzékeny lokális minimumokra,
— dimenziószámot redukáló lineáris kényszerfeltételek egyszerűen figyelembe vehetők: ha a kezdőpontok kielégítik a feltételt, az eljárás négy alaplépése nem vezethet ki az altérből.

Az eljárás hatékonysága a dimenziószám növekedtével ($n > 10$) csökken.

Megemlítjük még, hogy a módszert J. Box kiterjesztette bizonyos kényszerfeltételek melletti minimum keresésre [9]. Módszere (komplex módszer) $k \geq n+1$ pontot kezel egyidejűleg.

3.5 Összetett search módszerek

Az alábbi minimumkereső eljárások lényegében Rosenbrock ötletére épülnek: az alapiteráció minden esetben egyenesek menti minimumkeresésből és a következő iteráció számára új irányrendszer meghatározásából áll.

Az alapiterációkat a rövidség és áttekinthetőség kedvéért „álalgolban" írjuk le [13]. Az eljárások részletes leírása [10—13]-ban található.

Jelölések:

MIN (*i*) eljárás, a p_i irány mentén **x**-ből indulva meghatározza a minimumhelyet, és **x**-ben tárolja. (array $x[1:n]$ globálisan deklarált.)
Vonalmenti minimumkereséssel részletesebben a 4. szakaszban foglalkozunk.

ORTHONORM (*Q*) eljárás, a $Q = \{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \ldots \mathbf{q}_n\}$ vektorrendszert orthonormálja.

Minden további jelölést „szövegből deklaráltnak" tekintünk.

Swann módszere

```
for i:=1 step 1 until n do
begin x0:=x;
      MIN (i);
      αi:=abs (x−x0)
end;
for i:=1 step 1 until n do
begin qi:=0;
      for j:=i step 1 until n do
      qi:=qi+αjpj
end;
P:=ORTHONORM (Q);
```

Powell módszere

$P=\{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \ldots \mathbf{p}_n\}$ lineárisan független vektorrendszer.

$\mathbf{x}_0:=\mathbf{x}$;
for i:=1 step 1 until n do MIN (i);
for i:=1 step 1 until n-1 do $\mathbf{p}_i:=\mathbf{p}_{i+1}$;
$\mathbf{p}_n:=\mathbf{x}-\mathbf{x}_0$; MIN (n);

Smith—Fletcher-féle módszer

MIN (1);
for i:=2 step 1 until n do
begin $\mathbf{x}_0:=\mathbf{x}$; MIN (i);
for j:=1 step 1 until i-1 do MIN (j);
$\mathbf{p}_i:=\mathbf{x}_0-\mathbf{x}$; *MIN (i)*;
end; $\mathbf{v}:=\mathbf{p}_n$;
for i:=n step — 1 until 2 do $\mathbf{p}_i:=\mathbf{p}_{i-1}$;
$\mathbf{p}_1:=\mathbf{v}$;
P:=ORTHONORM (P);

4. Gradiens módszerek

A továbbiakban feltételezzük, hogy grad $f(\mathbf{x})=\left(\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_1}, \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_2}, \ldots \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_n}\right)$ létezik és számolható minden $\mathbf{x}\in X$-re.

A gradiens módszerek alapiterációja:

— a pillanatnyi $\mathbf{x}_p$ próbapontban kijelölni egy irányt,
— a kijelölt egyenes mentén meghatározni a minimumhelyet:

$$\mathbf{x}_{p+1}=\mathbf{x}_p+h_p\nabla_p$$

ahol ∇_p a p-ik vagy korábbi próbaponthoz tartozó gradiensből meghatározott vektor (pl. $\nabla_p=-\text{grad } f(\mathbf{x}_p)$ és $f(\mathbf{x}_p+h_p\nabla_p)$ minimum az $\mathbf{x}_p$-n átmenő ∇_p irányú egyenes mentén.

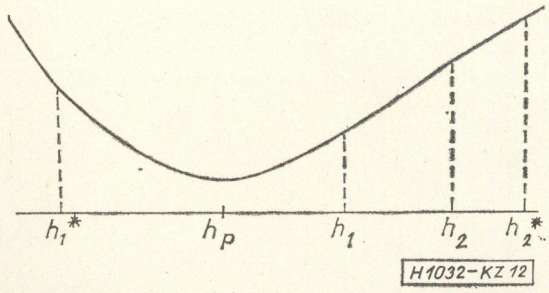
Először a vonalmenti minimum kereséssel foglalkozunk. A kijelölt egyenes mentén $f(\mathbf{x})=f(\mathbf{x}_p+h\nabla_p)=f(h)$ és h_p-t $[h_1^*, h_2^*]$-ben keressük. (A $[h_1^*, h_2^*]$ intervallumot változó lépésközzel $h_0=0$-ból indulva tapogathatjuk le az egyenes mentén: $h_1^*=h_{r-2}$, $h_2^*=h_r$, ahol r az első olyan lépés, amelyre $f(h_{r-1})<f(h_r)$. Ha feltesszük, hogy $f(h)$ unimodális $[h_1^*, h_2^*]$-on h_p meghatározására „Fibonacci search" az optimális stratégia, (s^*), az alábbi értelemben [14]:

$$\sup_g L_N(g, s^*)\leq \inf_s \sup_g L_N(g, s)+\varepsilon$$

ahol $g\in G$, $s, s^*\in S$, továbbá G a $[h_1^*, h_2^*]$-on definiált unimodális függvények tere, S az N-számú próbapontot kijelölő stratégiák tere, és L_N az N-ik próbapont felvétele után a minimumhelyet (h_p) magába foglaló intervallum hossza ($\varepsilon>0$ tetszőleges valós szám).

4.1. *Fibonacci search*

Megismételjük a feltételt: $f(h)$ unimodális $[h_1^*, h^*]$-on.



12. ábra

Az unimodalitás egyszerű következménye: tetszőlegesen kijelölve két próbapontot ($h_1, h_2\in[h_1^*, h_2^*]$, l. 12. ábra) a minimumhelyre, h_p, fennáll:

$$h_p\in\begin{cases}[h_1^*, h_2], & \text{ha } f(h_1)<f(h_2)\\ [h_1, h_2^*], & \text{ha } f(h_1)\geq f(h_2)\end{cases}$$

Fibonacci search lépésenként két-két próbapont alapján redukálja a minimumhelyet tartalmazó intervallumot. Az első két próbapont:

$$h_1=\frac{U_{N-2}}{U_N}(h_2^*-h_1^*)+h_1^*, \quad h_2=\frac{U_{N-1}}{U_N}(h_2^*-h_1^*)+h_1^*$$

ahol $U_0=1$, $U_1=1$, $U_2=2$, $U_3=3, \ldots, U_k=U_{k-1}+U_{k-2}$, a Fibonacci-féle számok. (N előre rögzített).

Tegyük fel, hogy $f(h_1)<f(h_2)$, azaz a következő próbapont párt $[h_1^*, h_2]$-ben kell kijelölni. Fibonnacci search szerint ezek a következők:

$$h_3=\frac{U_{N-3}}{U_{N-1}}(h_2-h_1^*)+h_1^*, \quad h_4=\frac{U_{N-2}}{U_{N-1}}(h_2-h_1^*)+h_1^*$$

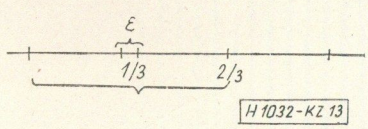
de $h_4\equiv h_1$, ugyanis:

$$h_4=\frac{U_{N-2}}{U_{N-1}}\left[\frac{U_{N-1}}{U_N}(h_2^*-h_1^*)+h_1^*-h_1^*\right]+h_1^*=$$
$$=\frac{U_{N-2}}{U_N}(h^*-h_1^*)+h_1^*=h_1$$

($f(h_1)\geq f(h_2)$ esetén, teljesen hasonlóan: $h_3\equiv h_2$).

Az első lépést kivéve a két próbapont közül egy azonos a megelőző lépés egyik próbapontjával.

Az N-1-ik próbapont az $\frac{U_2}{U_3}$ tényezővel redukált intervallum felezőpontja:



13. ábra

az N-ik próbapontot tőle ε távolságra jelöljük ki. Végeredményben N számú próbapont felvételével a kiindulási $[h_1^*, h_2^*]$ intervallumot $\frac{h_2^*-h_1^*}{U_N}+\varepsilon$-ra redukáltuk.

Összehasonlításképpen: a Fibonacci search-höz teljesen hasonló „Golden section search" n próbapont után

$$(h_2^*-h_1^*)\left(\frac{\sqrt{5}-1}{2}\right)^{n-1}$$

bizonytalansági intervallumot eredményez. A különbség nagy n értékek mellett kb. 17%. „Golden section search" a próbapontokat az aranymetszés arányának megfelelően jelöli ki.

Az első pontpár:

$$h_1=\frac{3-\sqrt{5}}{2}(h_2^*-h_1^*)+h_2^*$$

$$h_2=\frac{\sqrt{5}-1}{2}(h_2^*-h_1^*)+h_1^*$$

A vonalmenti minimalizálásnak ilyen jellegű módszereit érezzük leginkább számítógép orientáltnak. Szokásos azonban h_p-t közelítő formulákból számítani, ill. $[h_1^*, h_2^*]$ felett parabola illesztésen keresztül meghatározni.

4.2 Legmeredekebb leereszkedés (steepest decent) módszere

A módszer eredete Cauchy nevéhez fűződik, 1847-ben publikált dolgozatában nemlineáris egyenletrendszer megoldására alkalmazta: az

$$f_i(\mathbf{x})=0, \quad i=1, 2, \ldots n$$

egyenletrendszer minden megoldására $F(\mathbf{x})=\sum_i f_i^2(\mathbf{x})$ minimum és fordítva $F(\mathbf{x})$ azon minimumhelyei, amelyekre $F(\mathbf{x})=0$ gyökei az egyenletrendszernek. Az eljárás iterációnként a következő lépéseket végzi: a pillanatnyi próbapontban meghatározza a gradiens vektort, majd az ellentétes irány mentén minimumot keres:

$$\mathbf{x}_{p+1}=\mathbf{x}_p-h_p\,\mathrm{grad}\, f(\mathbf{x}_p)$$

PROC GRADIENS pontosan ezt az algoritmust hajtja végre.

A módszer alkalmazásánál egyik fő probléma a skálaválasztás: ez határozza meg a gradiens vektor irányát. A konvergencia abban az esetben a legjobb, ha azonos Δx_i, $i=1, 2, \ldots n$ változásokhoz a hibafüggvény közel azonos Δf növekménye tartozik. Ebben az irányban befolyásolja $f(\mathbf{x})$ viselkedését az $x_i'=\log x_i$ változó transzformáció [33]. (Ez a Δx_i növekményekről a $\frac{\Delta x_i}{x_i}$ relatív növekményekre való áttérést jelenti.) A gradiens vektor i-ik komponense a transzformáció után:

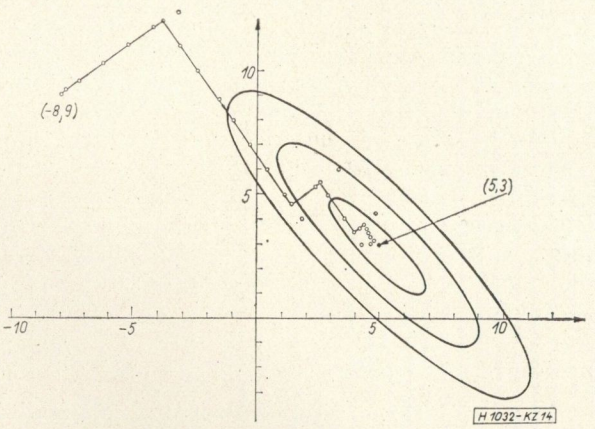
$$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i'}=\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i}\cdot x_i.$$

A transzformáció hatását a 7. szakaszban példán illusztráljuk.

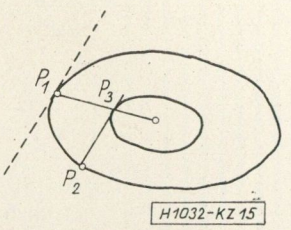
A konvergencia javításának másik módja Forsythe és Motzkin által javasolt „konvergencia gyorsító" lépések időnkénti beiktatása [16]. Eszerint bizonyos próbapontokban a gradiens irányt a legutóbbi két gradiens vektoriális összege helyettesíti.

4.3 Partan (párhuzamos érintők módszere)

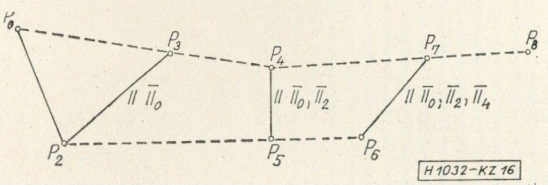
Partan egyike a leghatékonyabb gradiens technikáknak [15]. Az eljárás alapötlete geometriai megfigyelésen alapszik: pozitív definit kvadratikus formák



14. ábra. $f(x_1, x_2)=17(x_1-5)^2+17(x_2-3)^2+30(x_1-5)(x_2-3)$ minimumának keresése a „legmeredekebb leereszkedés" módszerrel. (Az ábra PROC GRADIENS felhasználásával készült)



15. ábra



16. ábra

(ellipszoidok) esetén egyszerűen konstruálható gradiens irányokból centrumon keresztül haladó vonalrendszer. Pl. két dimenziós esetben közismert, hogy koncentrikus ellipszisek párhuzamos érintőinek érintéspontjait összekötő egyenes átmegy a centrumon. Ennek megfelelő stratégia:

Válasszunk tetszőlegesen két próbapontot: P_1, P_2. Határozzuk meg a minimumot, P_3-at, a P_2-n átmenő P_1-beli érintővel párhuzamos egyenesen, majd P_1P_3 mentén. Az utóbbi minimum azonos a centrummal. (l. 15. ábra.)

„*General partan*" ennek az eljárásnak általánosítása n dimenziós euklideszi térre. A módszer alapvonása: n változós pozitív definit kvadratikus függvények esetén véges számú lépésben konvergál (pontosabban maximum $2n$-1 vonalmenti minimumkereséssel eléri a minimumhelyet).

Algoritmusa:

Tetszőlegesen választott P_0 pontból kiinduló P_0, P_2, P_3... töröttvonal mentén haladunk, amelyre fennáll, hogy

— P_k minimum a $\overline{P_{k-1}P_k}$ egyenesen, továbbá

— P_{2k+2} rajta van a $\overline{P_{2k-2}P_{2k+1}}$ egyenesen és $\overline{P_{2k}P_{k2+1}}$ párhuzamos a $P_0, P_2, P_4 \ldots P_{2k-2}$ pontbeli érintő hipersíkokkal. (A $\overline{P_0P_2}$ irány tetszőleges.)

„*Steepest descent partan*" az előbbi módszer változata: a páros indexű pontokban az ottani gradienssel ellentétes irányban lépünk, egyébként úgy, mint az előbbi algoritmus esetén.

A módszer konvergenciájára ugyanaz igaz, mint előbb. (Mindkét esetre elemi algebriai és geometriai bizonyítás olvasható [15]-ben.)

Konvergencia tulajdonságai miatt partan — ellentétben steepest descent módszerrel — hatékonyan alkalmazható összetett minimalizálási eljárások „végjátékaként".

5. Másodrendű módszerek

Ebbe a szakaszba soroljuk azokat a minimalizálási eljárásokat, amelyek felhasználják a hibafüggvény másodrendű parciális deriváltjait (vagy ezek közelítését).

Ezek az eljárások a gradiens módszerekhez hasonlóan egyenesek mentén haladnak a minimumhely felé.

Alapiterációjuk

$$\mathbf{x}_{p+1}=\mathbf{x}_p+h_pD_p\nabla_p$$

a gradiens módszerek alapiterációjától az iterációnkénti irány-megválasztásban különbözik: ∇_p helyett $D_p\nabla_p$, ahol D_p $f(\mathbf{x})$ másodrendű parciális deriváltjaival kapcsolatos mátrix („súlymátrix")

5.1 Newton-módszer

Legyen $f(\mathbf{x})$ kétszer deriválható X-en. Jelöljük X^*-al a minimumhely, $\mathbf{x}^*$, azon környezetét, amelyben $H=\left[\frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j}\right]$ pozitív definit. Legyen $\mathbf{x}_k \in X^*$ és tekintsük $f(\mathbf{x})$ helyett harmadik tagig vett, $\mathbf{x}_k$ körüli Taylor-sorát:

$$f(\mathbf{x})\approx f(\mathbf{x}_k)+\sum_i \left.\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i}\right|_{x=x_k} \Delta x_i + \\ +\frac{1}{2}\sum_i\sum_j \left.\frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j}\right|_{x=x_k} \Delta x_i \Delta x_j$$

Ennek a kifejezésnek a szélső értékét (az előbbi feltételek mellett minimumát) — a klasszikus szélsőértékszámítás szerint — a

$$\left.\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i}\right|_{x=x_k} + \sum_j \left.\frac{\partial^2 f(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j}\right|_{x=x_k} \Delta x_j = 0, \qquad i=1, 2, \ldots n$$

lineáris egyenletrendszer megoldása adja:

$$\Delta\mathbf{x}=-\mathrm{H}^{-1}\nabla_k$$

ahol

$$\nabla_k=\operatorname{grad} f(\mathbf{x}_k)$$

Ha $f(\mathbf{x})$ kvadratikus az eljárás nyilvánvalóan egyetlen lépésben befejeződik. ($\mathbf{x}^*=\mathbf{x}_k+\Delta\mathbf{x}$)

Ellenkező esetben iterative alkalmazandó:

$$\mathbf{x}_{k+1}=\mathbf{x}_k+h_p(-\mathrm{H}^{-1}\nabla_k)$$

ahol h_p h azon értéke, amelyre

$$f(\mathbf{x}_k+h(-\mathrm{H}^{-1}\nabla_k))=f(h)$$

minimum.

A H mátrix előállításának és invertálásának számolásigényessége miatt célszerű néhány iteráción keresztül H^{-1}-t azonosnak venni.

Davidon módszerében teljesen elkerüli a másodrendű deriváltak előállításával és a mátrixinvertálással járó nehézségeket [17]. Alapötlete: olyan az iterációnkénti elmozdulásra és gradiens különbségre épülő súlymátrix sorozat bevezetése, amely a Hess-féle mátrixhoz konvergál. Az alábbi algoritmus ennek a módszernek R. Fletcher és D. Powell által leírt változata [18].

5.2 Fletcher—Powell-módszer

Jelölések: $\mathbf{x}_k$, ∇_k, G_k a k-ik iteráció során a kezdőpont, gradiens és súlymátrix.

A k-ik iteráció:

— Az első lépés — $\mathbf{x}_{k+1}$ meghatározása — vonalmenti minimumkeresés; $\mathbf{x}_{k+1}$ minimum az $\mathbf{x}_k$-ból induló $-G_k\nabla_k$ irányú egyenes mentén.

— Határozzuk meg ezután a gradienst $\mathbf{x}_{k+1}$-ben és képezzük az

$$\mathbf{u}=\mathbf{x}_{k+1}-\mathbf{x}_k$$

$$\mathbf{v}=\nabla_{k+1}-\nabla_k$$

vektorokat, majd

— állítsuk elő G_{k+1}-et:

$$G_{k+1}=G_k+A_k+B_k,$$

ahol

$$A_k=\frac{\mathbf{u}\mathbf{u}^*}{<\mathbf{u},\mathbf{v}>},$$

$$B_k=\frac{-G_k\mathbf{v}(G_k\mathbf{v})^*}{<\mathbf{v},G_k\mathbf{v}>},$$

továbbá * transzponáltat, $<>$ skaláris szorzatot jelöl.

Az első alkalommal a súlymátrix szabadon választható: bármely pozitív definit mátrix lehet (pl. $G_1\equiv I$). Ha $f(\mathbf{x})$ kvadratikus, az eljárás n iteráción belül befejeződik. A szerzők [18]-ban a szokásos teszteken kívül 50—100 változós kvadratikus függvényeken végzett sikeres alkalmazásokról is említést tesznek.

A stop kritérium a másodrendű módszereknél — a gradiens módszerekhez hasonlóan — az iterációnkénti elmozdulás —, és a kitűzött irányvektor vizsgálatára épülhet.

Gyors konvergenciájuk miatt ezek a módszerek a tipikus „végjáték" stratégiák.

6. Speciális módszerek

Egyetlen módszerről teszünk itt említést, nevezetesen a minimax approximáció lineáris programozással történő megoldásáról. A módszer jelentős hazai irodalommal rendelkezik pl. [25], [26], [27] stb.

Feladat:

$$D(\mathbf{x})=\max_{\omega_e}|K(\omega_e)-F(\omega_e,\mathbf{x})| \qquad e=1, 2, \ldots t$$

(Csebisev-értelemben vett diszkrét hibafüggvény) minimumának előállítása, ahol

$K(\omega_e)$ diszkrét követelmény függvény,
$F(\omega, \mathbf{x})$ n paraméteres $[\mathbf{x}=(x_1, x_2 \ldots x_n)]$, x_i szerint differenciálható függvény ω független változóval.

A módszer alapötlete a feladat lineáris programozási feladatra való visszavezetése.

A lineáris programozás alapfeladata:

$$c\mathbf{x} \text{ minimalizálása } (\min_x c\mathbf{x} = ?)$$

az $\quad A\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$

$$x_i \geq 0 \quad i=1, 2, \ldots n$$

feltételek mellett, ahol A mxn-es, $\mathbf{b}$ mx1-es, és $\mathbf{c}$, $\mathbf{x}$ nx1-es mátrix.

Tételezzük fel, hogy D(x) minimumát szintén az $x_i \geq 0$, $i=1, 2, \ldots n$ feltételek mellett keressük, továbbá, hogy $F''(\omega, \mathbf{x})$ létezik és folytonos. Az $A\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ feltételi egyenlőtlenségek a következő módon adódnak:

Helyettesítsük $D(\mathbf{x})$ kifejezésébe n$F(\omega, \mathbf{x})$-et második tagig vett $\mathbf{x}^0$ körüli Taylor-sorával:

$$L(\mathbf{x}) = \max_{\omega_e} \left| K(\omega_e) - \left[F(\omega_e, \mathbf{x}^0) + \sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_e, \mathbf{x}^0} \cdot (x_i - x_i^0) \right] \right|.$$

Vezessük be az $x_{n+1} = L(\mathbf{x})$ jelölést. Világos, hogy az egyes ω_e pontokra fennáll:

$$x_{n+1} \geq \left| K(\omega_e) - \left[F(\omega_e, \mathbf{x}^0) + \sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_e, \mathbf{x}^0} \cdot (x_i - x_i^0) \right] \right|$$

$$e = 1, 2, \ldots t$$

amiből az abszolútérték jel elhagyásával és rendezéssel az alábbi 2t darab egyenlőtlenség adódik:

$$-\sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_1, \mathbf{x}^0} \cdot x_i - x_{n+1} \leq -K(\omega_1) + F(\omega_1, \mathbf{x}^0) - \sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_1, \mathbf{x}^0} \cdot x_i^0$$

$$\vdots$$

$$-\sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_t, \mathbf{x}^0} \cdot x_i - x_{n+1} \leq -K(\omega_t) + F(\omega_t, \mathbf{x}^0) - \sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_t, \mathbf{x}^0} \cdot x_i^0$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_1, \mathbf{x}^0} \cdot x_i - x_{n+1} \leq K(\omega_1) - F(\omega_1, \mathbf{x}^0) + \sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_1, \mathbf{x}^0} \cdot x_i^0$$

$$\vdots$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_t, \mathbf{x}^0} \cdot x_i - x_{n+1} \leq K(\omega_t) - F(\omega_t, \mathbf{x}^0) + \sum_{i=1}^{n} \left. \frac{\partial F(\omega, \mathbf{x})}{\partial x_i} \right|_{\omega_t, \mathbf{x}^0} \cdot x_i^0$$

Végül a minimalizálandó célfüggvény:

$$x_{n+1} = \text{minimum}$$

(vagyis $c=(0, 0 \ldots 0, 1)$]

Oldjuk meg ezt a lineáris programozási feladatot, jelöljük az eredményt $\mathbf{x}^{0*}$-el. Az $\mathbf{x}^{0*} - \mathbf{x}^0$ irány $\mathbf{x}^0$-ból $D(\mathbf{x})$ csökkenésének irányába mutat [24], a továbbiakban ezért alkalmazhatók a szokásos vonalmenti minimalizálási technikák. A vonalmenti minimum ($\mathbf{x}^1$) megkeresése után új iteráció kezdődik és az eljárás előírt pontosságig $\left(\frac{|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k|}{|\mathbf{x}^{k+1}|} < \varepsilon \right)$ folytatódik.

Megjegyezzük, hogy a gyakorlatban elterjedt az előbbi vonalmenti minimum keresést $[\mathbf{x}^k, \mathbf{x}^{k*}]$-ban ekvidisztans közönként felvett néhány pont vizsgálatára redukálni.

6. A módszerek összehasonlítása

Ebben a szakaszban a rendelkezésünkre álló eljárások között vonunk párhuzamot. Az eljárásokat az irodalomban szokásos — alább felsorolt — próbafüggvényekre alkalmaztuk. Kísérleteinket GIER számítógépen végeztük.

Próbafüggvények

Rosenbrock-féle függvény:

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$$

Kiindulási pont:	$(-1.2, 1)$
Minimumhely:	$(1, 1)$
Minimális függvényérték:	0

A minimumhely meredek, parabola alakú völgyben van.

Fletcher—Powell-féle függvény:

$$f(x_1, x_2, x_3) = 100\{[x_3 - 10 \cdot \Theta(x_1, x_2)]^2 + [r(x_1, x_2) - 1]^2\} + x_3^2$$

ahol

$$2\pi\Theta(x_1, x_2) = \begin{cases} \text{arc tg}\,(x_2/x_1), & \text{ha } x_1 > 0 \\ \pi + \text{arc tg}\,(x_2/x_1), & \text{ha } x_1 < 0 \end{cases}$$

és

$$r(x_1, x_2) = \sqrt{(x_1^2 + x_2^2)}$$

Kiindulási pont:	$(-1, 0, 0)$
Minimumhely:	$(1, 0, 0)$
Minimális függvényérték:	0

A minimumhely meredek oldalú, elliptikus völgyben van.

Powell-féle függvény:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_1 + 10x_2)^2 + 5(x_3 - x_4)^2 + (x_2 - 2x_3)^4 + 10(x_1 - x_4)^4$$

Kiindulási pont: (3, −1, 0, 1)

Minimumhely: (0, 0, 0, 0)

Minimális függvényérték: 0

(„szimplex"-hez a további kiindulási pontokat a fentiek kb. 0,3 sugarú környezetében véletlenszerűen vettük fel.) Illusztrációként az egyes eljárások működését az

$$f(x_1, x_2) = 17(x_1 - 5)^2 + 17(x_2 - 3)^2 + 30(x_1 - 5)(x_2 - 3)$$

függvényen rajzban adjuk (l. 4., 6., 11. és 14. ábra). Kiegészítésül csak az első néhány iterációt tüntetik fel a rajzok — erre a próbafüggvényre is közlünk táblázatot.

A táblázatok jelölése

Nf a próbapontok száma,

k az iterációk száma,

f függvényérték,

x_i független változó.

A rövidség kedvéért a számokban ismétlődő számjegyeket a következő módon jelöltük: pl. $5{,}\dot{9}\underset{5}{7}86 = 5{,}99999786$

A táblázatokból levonható néhány következtetés

— A leghatékonyabb eljárásnak „szimplex" látszik. Szimplex a minimumhelyet minden próbafüggvény esetén megtalálta, mindig a legkevesebb függvényérték számolást igényelve. Emellett a módszer egyszerűsége miatt rendkívül gyors is az eljárás.

— Pattern serach és a Rosenbrock-féle eljárás egybevetése meggyőzően mutatja a koordináta rendszer iterációnkénti elforgatásának jelentőségét.

— Meglepő, hogy pattern serach minden esetben jobbnak bizonyult a gradiens módszernél. Ennek értékelésénél figyelembe veendő, hogy a deriváltakat gradiens differencia hányadosokkal közelíti, azonban gyakorlatilag érdekes esetekben többnyire csak ez az út járható.

— A kétféle derivált számítás (közönséges, ill. logaritmikus) lényeges különbséget a gradiens módszerben nem okoz.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik munkánk elkészítésében segítségünkre voltak. Köszönettel tartozunk — közvetlen munkatársainkon kívül — *dr. Csurgay Árpádnak* megjegyzéseiért és a rendelkezésünkre bocsátott irodalomért, továbbá *Baranyi Andrásnak, dr. Géher Károlynak, Gulyás Ottónak, Németh Józsefnek* a kézirat átnézéséért és tanácsaikért.

Minimalizálási eljárások összehasonlítása Rosenbrock próbafüggvényén *2. táblázat*

Nf	Szimplex			Irányított keresés			Rosenbrock-módszer			Legmeredekebb leereszkedés		
	k	f	x_i	k	f	x_i	k	f	x_i	k	f	x_i
100	31	0,59	0,253, 0,044	17	0,56	0,250, 0,055	14	0,34	0,502, 0,216		3,499	−0,862, 0,726
200	62	$4^{10}-3$	0,995, 0,980	37	0,34	0,412, 0,171	24	$2^{10}-3$	1,022, 1,066		3,124	−0,714, 0,523
300	97	$8^{10}-14$	$0{,}\dot{9}\underset{6}{7}$, $0{,}\dot{9}\underset{6}{4}$	61	0,28	0,472, 0,224	35	$6^{10}-9$	$0{,}\dot{9}\underset{4}{2}$, $0{,}\dot{9}\underset{3}{8}$		2,784	−0,666, 0,434
400				83	0,17	0,580, 0,333					2,556	−0,597, 0,349
500				105	0,13	0,639, 0,407					2,282	−0,500, 0,268
600				126	0,11	0,667, 0,445					2,002	−0,414, 0,167
700				148	0,10	0,680, 0,462					1,744	−0,320, 0,099
800				168	0,094	0,693, 0,478					0,550	0,267, 0,059
900				192	0,092	0,696, 0,484					0,497	0,312, 0,104
1000				215	0,083	0,711, 0,505					0,401	0,371, 0,131

Minimalizálási eljárások összehasonlítása Fletcher Powell próbafüggvényen *3. tábláza*$_t$

Nf	Szimplex			Irányított keresés			Rosenbrock-módszer			Legmeredekebb leereszkedés		
	k	*f*	x_i	*k*	*f*	x_i	*k*	*f*	x_i	*k*	*f*	x_i
100	30	117,8	2,076, – 0,036 – 0,0075	11	520	– 0,963, 1,324 21,8,	6	283	– 0,055, 1,071 16,7,		2105	4,644, 2,380 6,422,
200	65	$7^{10}-3$	0,9998, 0,009 0,084	29	285	– 0,144, 1,141 16,77	12	226	0,047, 0,962 15,1		502	2,457, 1,880 6,011
300	99	$3^{10}-3$	0,9993, 0,006 0,006,	43	184	– 0,196, 0,940 13,53	19	2,94	0,947, 0,150 1,67		207	1,849, 1,340 6,017
400	131	$2^{10}-8$	1,0000, $-1^{10}-5$ $-1^{10}-4$	59	162	0,240, 0,751 12,52	24	$7^{10}-3$	1,001, – 0,003 – 0,02		125	1,573, 1,115 6,006
500	155	$5^{10}-13$	$0,\dot{9}\dot{3}$, $-2^{10}-8$ 7 $-2^{10}-7$	76	131	0,364, 0,801 11,35	32	$3^{10}-4$	1,000, – 0,001 – 0,01		89,3	1,411, 0,987 5,994
600				91	76,06	0,664 0,795 8,702	38	$2^{10}-5$	1,000, $-4^{10}-4$ $-4^{10}-3$		70,8	1,302, 0,904 5,983
700				108	53,7	0,715, 0,648 7,29	44	$6^{10}-6$	0,9999, $-5^{10}-6$ $-9^{10}-5$		57,9	1,218, 0,816 5,974
800				123	32,8	1,027, 0,614 5,37	51	$1^{10}-8$	0,9999, $-6^{10}-6$ $6^{10}-5$		51,7	1,161, 0,779 5,964
900				140	20,2	1,035, 0,47 4,28	58	$7^{10}-9$	$0,\dot{9}\dot{8}$, $-8^{10}-6$ 5 $8^{10}-5$		47,5	1,116, 0,748 5,955
1000				156	16,7	1,006, 0,42 3,98					43,9	1,067, 0,727 5,944

Minimalizálási eljárások összehasonlítása Powell próbafüggvényen *4. táblája*

Nf	Szimplex			Irányított keresés			Rosenbrock-módszer			Legmeredekebb leereszkedés		
	k	*f*	x_i	*k*	*f*	x_i	*k*	*f*	x_i	*k*	*f*	x_i
100	38	2,73	– 0,43, 0,0041 – 0,18, – 0,85	9	0,6	0,62, – 0,051 0,34, 0,58	6	0,96	0,96, – 0,089 0,23, 0,55		11,4	2, – 0,23 0, 1,4
200	75	$3^{10}-3$	$-7^{10}-2$, $8^{10}-3$ $-1^{10}-2$, $-1^{10}-1$	18	$2^{10}-2$	0,3, – 0,037 0,14, 0,16	12	$7^{10}-3$	0,24, – 0,024 0,12, 0,18		9,04	1,47, – 0,27 0, 1,2
300	111	$1^{10}-3$	$1^{10}-2$, $-4^{10}-4$ $-7^{10}-2$, $-7^{10}-2$	30	$2^{10}-3$	0,18, – 0,019 0,08, 0,08	16	$1^{10}-6$	$3^{10}-3$, $-3^{10}-4$ $1^{10}-2$, $1^{10}-2$		8,3	1,48, – 0,28 0, 1,11
400	149	$4^{10}-4$	$8^{10}-2$, $-8^{10}-3$ $7^{10}-3$, $6^{10}-3$	42	$5^{10}-4$	0,11, – 0,011 0,067, 0,067	20	$5^{10}-7$	$-9^{10}-4$, $9^{10}-5$ $1^{10}-2$, $1^{10}-2$		6,2	1,53 – 0,19 0, 1,06
500	186	$1^{10}-5$	$1^{10}-3$, $-2^{10}-4$ $-2^{10}-2$, $-1^{10}-2$	52	$1^{10}-4$	$9^{10}-2$, $-9^{10}-$ $4^{10}-2$, $4^{10}-2$	24	$5^{10}-7$	$-1^{10}-3$, $1^{10}-4$ $1^{10}-2$, $1^{10}-2$		4,0	1,21, – 1,19 0, 0,81
600	221	$9^{10}-10$	$-6^{10}-4$, $6^{10}-5$ $8^{10}-4$, $8^{10}-4$	63	$9^{10}-5$	$8^{10}-2$, $-8^{10}-3$ $4^{10}-2$, $4^{10}-2$	29	$4^{10}-7$	$-1^{10}-3$, $1^{10}-4$ $1^{10}-2$, $1^{10}-2$		3,8	1,19, – 0,19 0, 0,76

4. táblázat folytatása

Nf	Szimplex			Irányított keresés			Rosenbrock-módszer			Legmeredekebb leereszkedés		
	k	f	x_i	k	f	x_i	k	f	x_i	k	f	x_i
700	258	$2^{10}-13$	$7^{10}-5$, $-7^{10}-6$ $3^{10}-5$, $3^{10}-5$	73	$8^{10}-5$	$8^{10}-2$, $-8^{10}-3$ $4^{10}-2$, $4^{10}-2$	32	$5^{10}-9$	$7^{10}-3$, $7^{10}-4$ $3^{10}-3$, $3^{10}-3$		3,2	1,18, −0,14 0, 0,7
800				89	$7^{10}-5$	$8^{10}-2$, $-8^{10}-3$ $3^{10}-2$, $3^{10}-2$	36	$5^{10}-9$	$7^{10}-3$, $-7^{10}-4$ $3^{10}-3$, $3^{10}-3$		2,0	0,95, −0,15 0, 0,49
900				99	$4^{10}-5$	$7^{10}-2$, $-7^{10}-3$ $3^{10}-2$, $4^{10}-2$	40	$3^{10}-9$	$5^{10}-3$, $-5^{10}-4$ $2^{10}-3$, $2^{10}-3$		1,5	0,83, −0,13 0, 0,46
1000				11	$3\ 3^{10}-5$	$6^{10}-2$, $-6^{10}-3$ $3^{10}-2$, $3^{10}-2$	43	$7^{10}-10$	$3^{10}-3$, $-3^{10}-4$ $4^{10}-4$, $4^{10}-4$		1,0	0,77, −0,86 0, 0,39

Minimalizálási eljárások összehasonlítása az illusztrációként használt próbafüggvényen

5. táblázat

Nf	Szimplex			Irányított keresés			Rosenbrock-módszer			Legmeredekebb leereszkedés		
	k	f	x_i	k	f	x_i	k	f	x_i	k	f	x_i
100	31	$2^{10}-5$	5,002, 2,998	19	5,61	3,94, 4,22	13	$3^{10}-6$	4,9995, 3,009		156	5,206, −0,2095
200	61	9^{10} 14	$4{,}\dot{9}8_{6}$, $3{,}\dot{0}16_{6}$	37	$6\cdot3^{10}-3$	4,96, 3,04	25	$5^{10}-8$	4,9999, 3,0001		$2^{10}-2$	4,993, 2,966
300				56	$2^{10}-9$	5,00000, 3,00001	33	$1^{10}-12$	$4{,}\dot{9}3_{6}$, $3{,}\dot{0}5_{6}$		$8^{10}-7$	5,0004, 2,9995
400				63	$6^{10}-13$	$5{,}\dot{0}4_{6}$, $2{,}\dot{9}6_{6}$						

6. táblázat

„Legmeredekebb leereszkedés" logaritmus, ill. közönséges deriválttal Rosenbrock próbafüggvényén

Nf	Logaritmikus derivált		Közönséges derivált	
	f	x_i	f	x_i
100	3,499	−0,862, 0,726	3,598	−0,879, 0,746
200	3,124	−0,714, 0,523	3,146	−0,771, 0,604
300	2,784	−0,666, 0,434	2,898	−0,700, 0,499
400	2,556	−0,597, 0,349	2,625	−0,601, 0,371
500	2,282	−0,500, 0,268	2,390	−0,542, 0,305
600	2,002	−0,414, 0,167	2,181	−0,474, 0,216
700	1,744	−0,320, 0,099	1,984	−0,404, 0,175
800	0,550	0,267, 0,059	1,793	−0,337, 0,107
900	0,497	0,312, 0,104	1,597	−0,256, 0,079
1000	0,401	0,371, 0,131	1,387	−0,177, 0,026

IRODALOM

1. *S. Filippi—W. Clasmacher:* Zum Verfahren von Davidenko, Elektronische Datenverarbeitung 1967, Heft 2.
2. *Popper György:* Nemlineáris egyenletrendszerek. NIM Számítástechnikai Közlemények, 1967.
3. *S. H. Brooks:* A Discussion of Random Methods for Seeking Maxima, Operations Research Vol. 6 march, 1958.
4. *R. Hooke and T. A. Jeeves:* Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems, Journal Assoc. Comp. March. Vol. 8, 1962.
5. *H. H. Rosenbrock:* An Automatic Methods for Finding the Greatest or Least Value of Function, The Computer Journal 1960. number 3, pp. 175—184.
6. *C. F. Wood:* Review of Design Optimization Techniques, IEEE S.S.C. nov. 1965.
7. *M. J. Powell:* On the Calculation of Orthogonal Vectors, The Computer Journal nov. 1968.
8. *J. A. Nelder* and *R. Mead:* A Simplex Method for Function Minimization, The Computer Journal 1965. number 4, pp. 308—313.
9. *M. J. Box:* A New Method of Constrained Optimization and Comparison with Other Methods, The Computer Journal 1965. number 1, pp. 42—53.
10. *M. J. Powell:* An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives, The Computer Journal Vol. 7, 1964. pp. 155—162.
11. *W. I. Zangwill:* Minimizing a Function without Calculating Derivatives, The Computer Journal 1967. number 3, Vol. 10. pp. 293—297.

12. *W. H. Swann:* Report on the Development of a New Direct Search Method of Optimization, I. C. I. Ltd. Central Instrument Laboratory Research Note 64/3 1964.
13. *R. Fletcher:* Functionminimization without Evaluating Derivatives — a Review, The Computer Journal, Vol. 8, number 1, 1965. pp. 33—42.
14. *J. Kiefer:* Sequencial Minimax Search for a Maximum, Proc. Am. Math. Soc. 1953, 4, pp. 502—506.
15. *E. V. Schah R. J. Buehler* and *O. Kempthorne:* Some Algorithms for Minimizing a Function of Several Variables, Journal of SIAM, 12, 1964, pp. 74—92.
16. *G. E. Forsythe* and *T. S. Motzkin:* Acceleration of the Gradient Method, Bull. Amer. Math. Soc. Vol. 57, 1951.
17. *W. C. Davidon:* Variable Metric Method for Minimization, A. E. C. Research and Development Report, ANL- 5990 nov. 1959.
18. *R. Fletcher* and *M. J. D. Powell:* A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization, The Computer Journal Vol. 6, number 2, 1963, pp. 163—169.
19. *R. Fletcher* and *C. M. Reeves:* Function Minimization by Conjugate Gradients, The Computer Journal Vol. 7, number 2, 1964, pp. 149—154.
20. *L. B. Horwitz* and *F. E. Srachik:* Davidon's Method in Hilbert Space, Siam Journal on Applied Mathematics jul. 1968.
21. *A. R. Curtis* and *M. J. Powell:* Necessary Conditions for a Minimax Approximation, The Computer Journal, 1966. Vol. 8, number 4, pp. 358—362.
22. *A. R. Curtis* and *M. J. Powell:* On the Convergence of Exchange Algoritm for Calulating Minimax Approximations, The Computer Journal 1966, Vol. 9, number 1. pp. 78—81.
23. *A. R. Curtis* and *M. R. Osborne:* The Construction of Minimax Rational Approximations, The Computer Journal 1966, Vol 9. number 3, pp. 286—294.
24. *Y. Ishizaki H. Wakazuki* and *H. Watanabe:* Some Consideration on Minimax Approximation Problem for Network Design, Proc. 3 rd Allerton Conf. on Cirenit and System Theory (Urbana III) pp. 786—795. okt. 196.
25. *Géher Károly, Kovács Zsoltné, Légár Béla:* Áramkörtervezés lineáris programozással TKI dok. 1967.
26. *Géher—Halász:* Hálózattervezés lineáris programozással, Híradástechnika XVIII. évf. 7. sz.
27. *Herendi Miklós:* Híradástechnika XX. évf. 1. sz.
28. *D. J. Wilde:* Optimus Seeking Methods, Prentice Hall Englewood Cliffs, N. I. 1964.
29. *D. J. Wilde* and *C. S. Beightler:* Foundations of Optimization, Prentice Hall Englewood Cliffs N. I. 1967.
30. *William G. Scheerer:* Optimization with Coputers, Circuit Design by Computer Symposium 1967.
31. *G. C. Temes D. A. Calahan:* Computer-Aided Network Optimization, Proc. of the IEEE Vol. 55. no. 11, nov. 1967.
32. *H. A. Spang:* A Review of Minimization Techniques for nonlinear Functions, Siam Review Vol. 4. No. 4. okt. 1962.
33. *P. E. Fleischer:* Optimization Techniques in System Design, System Analysis by Digital Computer, edited by F. F Kuo and J. F. Kaiser.
34. *M. J. Box:* A Comparison of Several Current Optimization Methods, and Use of Transformations in Constrained Problems, The Computer Journal 1966, number 1, pp. 67—78.

SZEMLE

Összeállította: BALOGH PÁL

1969 végén tette közzé az OECD tudománypolitikai sorozatában hosszú éveken át készített jelentését Olaszország kutatásügyének helyzetéről.

A jelentés élesen elítéli az olasz kormány kutatási és oktatásügyi politikáját. Az olasz kormány erre megtiltotta a jelentés olaszországi publikálását. Egyetemi hallgatók és tudósok azonban megszerezték a jelentést, egyes részeit kiadták a sajtónak, azonban a hevenyészett fordítások megbízhatatlanok voltak, s nem lehetett eldönteni, hol végződik a szenvtelen hangú, tárgyilagos OECD-jelentés, s hol kezdődnek az olasz belpolitikának megfelelő szövegezések. Végül megjelent az OECD hivatalos kiadásában a felmérés eredménye, s ennek alapján érthetővé válik, miért látta volna szívesen az olasz kormány, ha tartalma csupán az OECD dossziéiban szerepelne.

A jelentésből ugyanis egyértelműen kitűnik, hogy a kutatás és oktatás támogatása területén Olaszország az európai fejlett, ipari országok listájának legvégén kullog. 1967-ben Olaszország egy főre jutó kutatási-fejlesztési ráfordításai 10,7 dollárra rúgtak, míg a megfelelő angol adat már 1965-ben 39,8 dollár, a francia pedig 37,9 dollár volt. Az amerikai ráfordítások, amelyeket erősen felduzzasztanak a hatalmas katonai és űrkutatási kiadások, 1964-ben 110,5 dollárra rúgtak, és azóta méginkább megnövekedtek. (Kissé kijózanítóan hatnak ezek az adatok manapság, amikor Amerikában arról siránkoznak, mennyire meggyengült az amerikai tudomány és kutatás helyzete a világ többi részének gyorsan fejlődő tudományos kutatási ráfordításai fényében.) A kutatásra és fejlesztésre fordított kiadások százalékos aránya a bruttó nemzeti termékhez Olaszországban ugyancsak rendkívül kevés, 0,6%, szemben Nagy-Brittannia 2,3, Franciaország 2,0 Japán, 1,4 százalékával. Az ezer lakosra jutó kvalifikált kutatók és technikusok arányát illetően Olaszországban a megfelelő adat 6, ugyanakkor Nagy-Britanniában 29,4, Svédországban 21,6, Nyugat-Németországban 18, az Egyesült Államokban pedig 35,8.

A tudományos és ipari kutatás utánpótlását szolgáltató felsőoktatás helyzetét vizsgálva, a jelentés megállapítja, hogy az egyetemek csupán egyharmad annyi pénzzel rendelkeznek, mint amennyi szükséges lenne feladatuk alapos ellátásához. Ilyen körülmények között természetszerű, hogy a kutatásügy húzza a legrövidebbet. A felmérés adatai ugyan már két évesek, de az utolsó két év során mit sem javult a kutatás helyzete, sőt sok tekintetben még súlyosbodott. *(Műszaki-gazdasági Adattár)*

*

Amerikai, japán és nyugatnémet cégekből álló konzorcium szerződést kötött az iráni kormánnyal 175 millió dollárba kerülő mikrohullámú távközlési rendszer megépítésére. A megállapodás értelmében a konzorcium a Perzsa-öböltől a Szovjetunió határáig 500 távközlési állomást épít. A mintegy 60 várost és több száz falut összekötő 14 000 km hosszúságú hálózat — állítólag — a világ egyik legmodernebb ilyen létesítménye lesz. A hálózaton telefon-, távíró-, televízió- és műszaki adatokat közlő forgalom bonyolódik majd le.

A távközlési rendszer első szakasza a tervek szerint 1971-ben kezdi meg működését. A hálózat többi részének építését 1972. szeptemberben fejezik be. *(Reuter, UPI, febr.)*

(Folytatás a 338. oldalon.)

Új célok, új utak a tudományos minősítésben

20 évvel ezelőtt jött létre az Országos Aspirantúra Bizottság. Egy évvel később megalakult a Tudományos Minősítő Bizottság. Megszűntek a régi tudományos címek és kétfokozatú (a tudományok kandidátusa és a tudományok doktora tudományos fokozat) tudományos minősítési rendszer került bevezetésre.

A legkiválóbb tudósok tudományos eredményeik értékelése alapján a tudományok kandidátusa, illetve a tudományok doktora tudományos fokozatot kapták. Ekkor kapott tudományos fokozatot sok olyan kiváló tudós is, aki a felszabadulás előtt méltatlanul mellőzésben részesült.

Többek között az aspirantúra bevezetésével, szélesre tárultak a tudomány kapui a tehetséges munkás és paraszt fiatalok előtt is. A tudományos minősítés ma élő rendszerében fokozatot nyertek közül sokan már alkotó tagjai a Magyar Tudományos Akadémiának.

A felszabadulás után alkotott jogszabályokban a múlt minősítési rendjéből sok értékes vonást sikerült alkotó hagyományként átvenni.

Az elmúlt két évtized legfontosabb célkitűzései voltak:

— a tudományos élet minden dolgozójával szemben magasabb, egységes követelmény, ugyanakkor mindenki részére az azonos lehetőségek biztosítása;
— gyengíteni a tudományos monopóliumokat;
— segíteni azt, hogy a tudományos alkotómunka minél hatékonyabban szolgálja a szocializmust építő társadalom érdekeit.

Megállapítható:

— az építő, demokratikus tudományos közvéleményt képviselő olyan élő és hatékony rendszer jött létre a tudományos minősítés területén, melyet a tudományos élet dolgozói a magukénak tekintenek;
— a magyar tudományos fokozatoknak — hazai tekintélyük mellett — mind a szocialista, mind a kapitalista országokban nagy nemzetközi tekintélye van.

A közelmúlt években tudományos életünk fejlődésének erősen gyorsuló szakaszában a törvényesség megőrzése mellett a Tudományos Minősítő Bizottság elvi állásfoglalásokkal biztosította azt, hogy a 20 éves múltra visszatekintő központosított tudományos minősítési rendszer szüntelenül a társadalmi haladás időszerű kérdéseinek irányában formálja a tudományos közéletet.

Ilyen jelentős elvi állásfoglalások voltak többek között:

1. Magasszintű tudományos munka révén létrejött társadalmilag jelentős és hasznosított alkotások tudományos fokozattal történő elismerése.
2. Tudományos minősítés kollektívák által elért tudományos eredmények alapján.
3. A tudományok doktora fokozat megszerzésével kapcsolatos személyi és szakmai követelményrendszer felvetése és kidolgozása.
4. Kiemelkedő és közismert eredményekben gazdag, társadalmilag hasznos, alkotó tudományos élet honorálása tudományos fokozattal a munkásság téziseinek alapján.

Az elmúlt két évtizedben a tudományos minősítés terén is fellelhetők voltak a tudományos közéletünk egészére jellemző hibák. Nem sikerült néhány olyan kérdést rendezni, melyek a fejlődés akadályozói voltak. Többek között:

1. A tudományos minősítésben ne az e célra készített disszertáció legyen központi jelentőségű.
2. Megszüntetni az elméleti kutatók és kutatás javára fennálló egyoldalúságot.
3. A TMB szakmai fórumainak és más tudományos fórumoknak nagyobb és jól szabályozott szerep biztosítása a tudományos minősítésben.
4. A tudományos minősítés kerüljön közelebb a társadalom időszerű igényeit magasszintű tudományos munkával megoldó alkotómunka művelőihez, műhelyeihez.
5. Biztosítani a tudományos minősítés minden forumán az objektív bírálatot, a bátor, kritikus tudományos közéletet.

Az MSZMP Tudománypolitikai Irányelvei a tudományos minősítésre vonatkozóan is összegezték a tapasztalatokat és meghatározták a jövő útját.

Az MSZMP K. B. Tudománypolitikai Irányelveiből és vitaanyagából idézzük fel a legfontosabb megállapításokat:

A tudomány hazánkban felbecsülhetetlen jelentőségű, a tudomány és a szocializmus szövetsége forradalmunk lényeges eleme.

A tudományos kutatásoknak fokozottabb mértékben kell igazodniok a társadalmi igényekhez: közvetlenül is szolgálniok kell a népgazdaság, a szocialista kultúra az oktatásügy és az egészségügy fejlesztését.

Tudományos életünkben nem kielégítő a gondolatok, az eredmények és kudarcok minősítése, nem elég nyílt, bátor, alkotó a kritikai közszellem. Úgyszólván hiányzik az alulról felfelé irányuló szakmai jellegű bírálat és nem ritka az egy szinten álló tudományos káderek között sem az udvarias, de elvtelen kölcsönösség. A közéleti és kritikai szellem javítása alapvetően politikai feladat.

Pártunk következetesen síkraszáll a tudományos közélet tisztaságáért, küzd a szubjektivizmus, a szűk érdeket képviselő csoportosulások, a tudományos monopoliumok ellen. Bátorítja a tudományos vitákat, támogatja a tudomány egészséges fejlődését szolgáló különböző tudományos iskolákat és valóban demokratikus tudományos közélet megteremtésére törekszik.

A tudományos tevékenység lehetősége hazánkban túlzottan a tudományos intézményekben való alkalmazáshoz kötődik. Az e munkahelyeken kívül dolgozó értelmiségiek (állami vagy gazdasági területen dolgozó szakemberek, középiskolai tanárok stb.) kevés segítséget kapnak munkájukhoz (ösztöndíj, órakedvezmény, intézeti kutatási lehetőségek, kutatóintézeti alkalmazás meghatározott időre stb.)

Pártunk fontosnak tartja a politikai, ideológiai követelményeknek megfelelő, szakmailag kiváló tudományos erők kiválasztását, a tehetségük kibontakoztatásának segítését, az ehhez szükséges ösztönzési, képzési, tudományos minősítési rendszert.

A hazai tudományos erők nevelésében jelentős szerepet játszó tudományos minősítés több vonatkozásban továbbfejlesztendő. A tudományos minősítés központi irányító szerve továbbra is a Tudományos Minősítő Bizottság legyen. A tudományos minősítés kétfokozatú rendszerét fenntartva azt határozottabban társadalmi, gazdasági, tudományos célkitűzéseink szolgálatába kell állítani.

A tudományos minősítés alapja a jelenleginél szélesebben értelmezett tudományos eredmény legyen. A minősítés egy-egy tudományág reális értékrendjét mutassa.

A tudományos fokozat az egyének olyan tudományos teljesítményének legyen a mércéje, amely összhangban van a társadalmi igényekkel. Az ilyen szempontból jelentéktelen témákat ne honorálják tudományos fokozattal. A minősítés alapjait szolgáló lehetőségek szűkek; a minősítés alapja szinte kizárólag az e célból írt disszertáció; nem elég széles körű az alkalmazott kutatási eredmények tudományos fokozattal történő elismerése; annak ellenére, hogy a jelentős tudományos eredmények mindinkább komplex munkacsoportok tevékenysége nyomán születnek, mégis nagyon ritka a kollektív munkával elért eredmények fokozattal történő honorálása.

A tudományok doktoraival szemben fokozott szakmai és tudományos — közéleti követelményeket kell támasztani, s a fokozat odaítélésénél figyelembe kell venni az arra pályázók teljes tudományos munkásságát.

Különösen a múltban többször előfordult, hogy tudományos fokozatra pályázók kifejezetten magyar témákat külföldön védtek és az elbírálásra legilletékesebb magyar kutatóknak nem volt módjuk a fokozat megítélésében állást foglalni. A tudományos minősítés terén a külföldi kapcsolatokat arra kell felhasználni, hogy elsősorban az ún. hiányszakmákban — egyes tudományszakok fejlődésének meggyorsítása,

továbbá a hazaiaktól eltérő jelentős külföldi tudományos iskolák megismerése végett — szerezzenek szakembereink külföldön tudományos fokozatot. Elismerten színvonalas külföldi kutatóhelyekre igényesen kiválasztott jelöltek küldésével kell gondoskodni arról, hogy a külföldön képzett tudósaink jelentős szerepet tölthessenek majd be a hazai tudományos életben.

Többféle szervezett módon (egyetemi és kutatóintézeti tudományos ösztöndíjak; szakmérnöki, szakjogászi képzés; szakorvosi vizsgák; egyetemi doktorátus; aspirantúra) biztosítandó a tudományos fokozat megszerzésére való felkészülés. A fokozat megszerzését szolgáló előkészítésben az egyetemek nagyobb szerepet kapjanak és vállaljanak.

Az elmúlt 20 év tapasztalatainak és a felmért társadalmi igénynek alapján, az MSZMP Tudománypolitikai Irányelveinek útmutatása szerint kerültek megalkotásra a Népköztársaság Elnöki Tanácsának 1970. évi 9. sz. törvényerejű rendelete és a Magyar Forradalmi Munkás—Paraszt Kormány 12/1970. (V. 5.) sz. rendelete. E két jogszabály teszi lehetővé és biztosítja a tudományos minősítés továbbfejlesztését. E két jogszabály lényeges pontjainak áttekintése megmutatja a tudományos minősítés új útjait, lehetőségeit.

Világjelenség, hogy a társadalmi átalakulás, a világgazdaságban végbemenő rohamos technikai, technológiai fejlődés a mi társadalmunkban is parancsolóan előírják az új és új tudományos eredményekre való támaszkodást. A tudománynak termelőerővé válása valóságos tendencia. Ezért a jövőben csak a társadalmi fejlődés követelményeivel összhangban álló tudományos téma megoldása ismerhető el a kandidátusi tudományos fokozattal. A tudományok doktora fokozat elnyeréséhez pedig a társadalmi fejlődés követelményeivel összhangban álló; a tudományágazat továbbfejlődését eredményező átfogó tudományos feladat megoldása szükséges.

Szerte az országban olyan kutatások is folynak, melyek a maguk nemében érdekesek lehetnek — és a kutatás szabadságát biztosítandóan senki sem tiltja meg művelésüket —, de a társadalmi hasznosság kritériumát nem elégítik ki, így ezek eredményei nem ismerhetők el tudományos fokozattal.

Világos, hogy az alap-, alkalmazott- és fejlesztő kutatások megfelelő aránya és egészséges egymásra hatása visz gyorsan előre. A jövőben sem szenvednek hátrányt, akik alapkutatás területére tartozó témákon dolgoznak, de most az a törekvés, hogy:

— a gyakorlati hasznú kutatás honorálása erősödjék;
— váljanak érdekeltté, elismertté azok a kutatók is, akik igényes tudományos munkával társadalmunk időszerű kérdéseit jelentős alkotásokkal oldják meg és legtöbbször sem idejük, sem kedvük nincsen ahhoz, hogy külön e célra készült értekezéssel pályázzanak a tudományos fokozatért;
— a disszertációcentrikusság feloldódjék.

Ennek érdekében:

— alapkutatási eredményeken kívül a minősítés alapjául szolgálhat tudományos tevékenységet igénylő, a társadalom számára hasznos, új és- a gyakorlatban hasznosított alkotás, különösen: építmény, berendezés, termelési eszköz, termék, műszer; növény- és állatfajta; technológiai, diagnosztikai és terápiás eljárás; elvi szempontból új, jelentős törvénytervezet, illetőleg igazgatási vagy közgazdasági koncepció;
— műszaki alkotás, szabadalom, technológiai eljárás stb. leírása is szolgálhat a tudományos minősítés alapjául, ha a pályázó az alkotás leírása mellett közli azon adatokat is, melyekből megállapítható, hogy az alkotás tudományos tevékenységet igényelt, új és azt a gyakorlatban már hasznosították;
— kivételesen a pályázó munkásságának eredményeit összefoglaló tézisek is benyújthatók a tudományos fokozat megszerzése céljából;
— kiemelhető és közismert tudományos eredményeket elért kutatók minősítése során (elsősorban a tudományok doktora fokozatra pályázók esetében) el lehet tekinteni a benyújtott tézisek nyilvános megvédésétől.

A minősítés alapjául szolgáló eredmények — egyénileg definiálható részteljesítmények alapján — kollektív munka keretében elért eredmények is lehetnek.

Emelkednek a tudományos fokozatra pályázókkal szemben a szakmai és személyi követelmények.

Doktori fokozatra pályázók esetében nemcsak a doktori értekezést kell vizsgálat tárgyává tenni, hanem a pályázó egész tudományos, nevelői, politikai, közéleti tevékenységét is, tehát az egész egyéniségét kell mérlegre tenni.

Nem vehet részt szervezett képzésben, nem ítélhető oda tudományos fokozat annak, aki a szocialista erkölcs szabályai ellen súlyosan vétett, ill. aki a közügyektől eltiltást kimondó bírósági ítélet hatálya áll.

Tudományos fokozat nem ítélhető oda olyan értekezés alapján, mely új tudományos eredményt nem tartalmaz.

Az MSZMP Tudománypolitikai Irányelvei megállapítják, hogy az ország tudományos kutató bázisa jelenleg népgazdaságunk teherbíró képességének, országunk méreteinek megfelelő, további gyors számszerű növelésére nincsen szükség. A kutatóállomány struktúrája azonban több területen nem megfelelő és nehezen alkalmazkodik az aktuális célkitűzésekhez. Ezért az aspirantúra minden formájánál erősen érvényesül a tematikai preferálás.

A jövőben csak meghatározott aspiránsi témákra lehet pályázni. E témákat a TMB a tudományszak művelésében érdekelt főhatósággal egyetértésben jelöli ki.

A főhatóság előre felméri és fedezi a kutatás anyagi feltételeit, valamint az aspiránsok lehetőleg koncentrált elhelyezése mellett az aspirantúra idejére biztosítja a zavartalan kutatómunkát.

A belföldi ösztöndíjas aspirantúra időtartama 3 év, formája változatlan, de tudatosan eszközül szolgál a kutatóállomány összetételében szükséges szerkezeti átalakításhoz vagy teljesen új, kifejlődő tudományszakok meghonosításához.

Az ösztöndíjas aspiránsok olyan ösztöndíj megállapításban részesülnek, hogy az aspiránsi évek ne jelentsenek számukra anyagi hátrányt.

A belföldi levelező aspirantúra a jövőben kifejezetten olyan gyakorlati szakemberek számára lesz fenntartva, akik a társadalmi fejlődés követelményeivel összhangban álló tudományos téma megoldásán dolgoznak és megjelent írásművekkel vagy más módon igazolják, hogy a kutatásban előrehaladtak. E képzési formánál megszűnik a heti kutatónap, az évenkénti rendkívüli szabadság. Témája befejezéséhez azonban a levelező aspiráns 6—12 hónap rendkívüli szabadságot kap (ösztöndíjjal) és munkáját az aspiránsvezető vezetésével a kijelölt és biztosított tudományos kutatóhelyen végzi.

Az aspirantúrával kapcsolatos fenti alapvető elvek érvényesítése mellett külföldi ösztöndíjas, ill. levelező aspirantúrára vesz fel pályázókat a TMB, ha

a) a választott tudományszakban nincs kellő számú tudományos fokozattal rendelkező szakember és a szűkebb szakterület helyzete kellően indokolja a minősítettek számának gyorsabb növelését;

b) anyagi, műszaki vagy személyi feltételek hiányában a tanulmányok belföldön nem végezhetők el vagy az adott tudományszakban külföldön a hazaitól eltérő módszerekkel kutató, jelentős tudományos iskola működik.

A külföldi ösztöndíjas és levelező aspiránsok olyan ösztöndíjban és segélyben részesülnek, melyek vonzóvá teszik e képzési formát.

Az értékelések elbírálása során csökken a formális elemek szerepe és a súlypont a lényeges kérdések kritikai megvilágítására, a tényleges bírálatra, a bíráló bizottság értékelő munkájára helyeződik át.

Ennek megfelelően figyelemre méltóan módosul az opponensek szerepe. Véleményükben részletesen ki kell fejteniük az értekezés érdemeit és hibáit; a lefolytatott kutatás módszereinek értékelését kell adniuk; ideológiai vonatkozású értekezés esetén vizsgálni kell, hogy a marxizmus—leninizmus elmélete alapján és módszereinek alkalmazásával történt-e a forrásanyag feldolgozása, az elvi-elméleti kérdések megválaszolása; tételesen állást kell foglalniuk arról, hogy a pályázó mely tudományos eredményeit ismerik el új tudományos eredményként. Nyilatkozniuk kell arról, hogy az értekezés nyilvános vitára bocsátását javasolják-e, vagy sem.

Az opponens tehát a jövőben csak a nyilvános vitára bocsátás kérdésében köteles opponensi véleményében előre állást foglalni. A kért tudományos fokozat odaítélésének kérdésében pedig, mint a bírálóbizottság többi tagja, a bírálóbizottság zárt ülésén titkosan szavazva foglal állást.

Az opponensek többségének negatív véleménye alapján a kandidátusi, illetve doktori értekezés nyilvános vitára általában nem bocsátható. A pályázó kérésére azonban a TMB hozzájárulhat a nyilvános vita lefolytatásához.

A kandidátusi fokozatra pályázó értekezésének benyújtása előtt kérheti a TMB-től a téma jóváhagyását. Ha a TMB a témát előzetesen jóváhagyta és a pályázó értekezését öt éven belül benyújtja, az előbírálat során adott véleményben ezt a témát nem lehet kifogásolni.

A kandidátusi filozófiai vizsgák rendje változatlan. A nyelvi és szakmai kandidátusi vizsgák terén két lényeges változás történt:

— nem kötelező egy alapfokú nyelvvizsga mellett egy középfokú állami nyelvvizsgát is tenni, hanem elegendő két nyelvből speciális kandidátusi nyelvvizsga letétele az egyetemen;
— a szakmai kandidátusi vizsga a jövőben alaptárgyi és szaktárgyi vizsgából áll.

A tudományos minősítés központi irányító szerve továbbra is a Tudományos Minősítő Bizottság.

A minősítéssel foglalkozó szervezet is alapjaiban változatlan marad, azonban a szakmai fórumok nagyobb szerepet kaptak. Pl. a TMB szakbizottságai jogot kaptak a kandidátusi fokozat odaítélésére. A doktori fokozatot — annak nagyobb tudománypolitikai jelentősége miatt — továbbra is a Tudományos Minősítő Bizottság plénuma ítéli oda.

Növekedett az egyetemek (főiskolák) szerepe a tudományos fokozatra pályázók előkészítésében. Feladataik és jogaik bővültek:

a) a TMB felkérésére kidolgozzák a szakmai vizsga egyes tárgyainak vizsgaanyagát;
b) a TMB felkérésére vizsgabizottságokat alakítanak, kandidátusi vizsgát folytatnak le;
c) gondoskodnak a beosztott aspiránsok filozófiai és idegennyelvi oktatásáról, valamint vizsgáztatásáról;
d) az aspiránsok részére speciál-kollégiumot tartanak;
e) javaslatot tehetnek szakmai kandidátusi vizsga egyes tárgyai alól történő felmentésre, ha a pályázó az egyetemen a vizsgatárgyból kiváló eredménnyel doktori szigorlatot tett;
f) javaslatot tehetnek kiemelkedő színvonalú egyetemi doktori értekezésnek kandidátusi értekezésként való elfogadására.

A jövőben a pályázók vizsgadíjat, valamint minősítési eljárási díjat kötelesek fizetni. A minősítési eljárásban közreműködő szakemberek pedig díjazásban részesülnek.

A munkahely szerint illetékes miniszter, illetőleg a felügyeletet gyakorló szerv vezetője biztosítja a tudományos fokozattal rendelkező személy tudományos munkájához szükséges feltételeket. Ennek során — hatályos jogszabályok keretei között — rendkívüli szabadságot engedélyezhet jelentősebb kutatómunka elvégzésére vagy tanulmány elkészítésére.

A fokozattal járó illetménykiegészítés ötévenkénti felülvizsgálatára vonatkozó rendelkezés hatályát veszti, azonban meg kell vonni az illetménykiegészítést attól a kandidátusi vagy doktori fokozattal rendelkező személytől; aki neki felróhatóan nem fejt ki tudományos munkásságot; vagy akit a bíróság a közügyektől jogerősen eltiltott; aki a tudományos fokozatra méltatlan, a tudományos etika ellen vét; továbbá attól, aki a tudományos fokozattal járó kötelezettségeit felhívás ellenére nem teljesíti.

A TMB javaslatot tehát az illetékes egyetemen a tudományok doktora részére címzetes egyetemi (főiskolai) tanári cím, a tudományok kandidátusa részére pedig címzetes egyetemi (főiskolai) docensi cím adományozására, ha a tudományos fokozattal rendelkező személy a tudományos szakemberképzés terén kiemelkedő tevékenységet fejtett ki.

A külföldön szerzett tudományos fokozatot a megfelelő magyar tudományos fokozattal kell honosítani, ha annak megszerzése a TMB előzetes jóváhagyásával történt. A TMB ilyen esetben is megkövetelheti belföldön kiegészítő vizsgák letételét, szükség esetén hivatalos bírálót küldhet külföldre, vitás esetekben a külföldi szervtől további tájékoztatást kérhet.

Ha a tudományos fokozat megszerzése külföldön nem a TMB kezdeményezése alapján történt, a TMB a honosítás felől az összes körülmény mérlegelése alapján határoz: azt megtagadhatja, illetőleg további feltételekhez kötheti.

A TMB engedélyével nem magyar állampolgár saját költségén is részt vehet belföldi aspirantúrán.

A kutatók, a tudományos élet dolgozói körében a tudományos minősítésre vonatkozó jogszabályok, tudnivalók nagy érdeklődésre tartanak számot. Ezt kívánta kielégíteni e cikk (melynek melléklete tartalmazza a minősítettek megoszlását a TMB szakbizottságonként) a legfontosabbnak tartott részletekre vonatkozóan.

1. táblázat

Minősítettek megoszlása	doktorok	kandidátusok
Állam- és jogtudományok	20	115
Állatorvostudományok	11	67
Biológiai tudományok	43	192
Filozófiai tudományok	7	85
Fizikai és csillagászati	22	120
Föld- és ásványtani tud.	23	44
Földrajztudományok	7	52
Gyógyszerészeti tudományok	1	11
Irodalomtudományok	12	129
Kémiai tudományok	58	422
Közgazdaságtudományok	20	207
Közlekedéstudományok	3	15
Matematikai tudományok	23	81
Mezőgazdasági tudományok	27	363
Műszaki tudományok	*81*	*581*
Művészettörténeti tudományok	9	22
Neveléstudományok	3	46
Nyelvészeti tudományok	20	81
Orvostudományok	*94*	*675*
Pszichológiai tudományok	4	25
Történelemtudományok	25	214
Zenetudományok	3	13
Összesen	516	3 560

SZEMLE

(Folytatás a 335. oldalról.)

Az elkövetkező négy éven belül az integrált áramkör forgalom megkétszereződésére számítanak, ami a jelenlegi ártendencia figyelembevételével a darabszám megnégyszereződését jelenti. Az integrált áramköröket elsősorban az ipari elektronikában és az adatfeldolgozás területén fogják alkalmazni, míg a szórakoztató elektronikai alkalmazás még néhány évig várat magára. Az integrált áramkörök várható árcsökkenése egyébként minden bizonnyal a szórakoztató elektronikát is forradalmasítja. A 80-as években bizonyára bekövetkezik az az idő, amikor a zsebrádiót az elem kimerülése után — a jelenlegi nem utántölthető gázöngyújtóhoz hasonlóan — egyszerűen eldobják. *(Blick durch die Wirtschaft, 1970. febr.)*

1970-ben a lengyel elektronikai cikkek exportja 100 millió deviza zlotyt (cca 25 millió dollár) tesz ki, ez az érték azonban 1975-ig az előzetes tervezetek szerint 850 millió deviza zlotyra emelkedik. A legnagyobb növekedést a digitális számítógépek tekintetében várják. A közeljövőben ugyanis az ez ideig tranzisztoros technikával készült berendezéseket a harmadik generációhoz tartozó integrált áramkörös berendezésekkel kívánják helyettesíteni. Növelni kívánják az ipari automatikai cikkek választékát is, s e célból külföldi licenceket vásároltak. Digitális számítógépekhez tartozó különböző berendezéseket is fognak gyártani. Mindezek alapján 1975-ben az elektronikai ipar és az ipari automatika Lengyelország összexportjában a harmadik helyet foglalja el.

(Die Computer Zeitung, 1970. VII. 24.)

DR. KATONA JÁNOS
a műszaki tudományok doktora
Híradástechnikai Ipari Kutatóintézet

Vékony mágneses rétegekkel működő memóriák kutatása

ETO 621.377.622.322.5

Az elektronikus számítógépek teljesítőképessége döntő mértékben a gép memóriájának kapacitásától és sebességétől függ. Az elmúlt 10—15 év alatt a számítógépek tervezésénél elsőrendű szempont volt az, hogy a memória-egység tárolóképessége és működési sebessége növekedjék. Megállapítható, hogy ez a növekedés az idő függvényében közel exponenciális jellegű és a duplázási idő közelítően 3 év.

Az elmúlt években a legelterjedtebb memóriatípus a ferrit-gyűrűkből épített mátrixos memória volt. A fejlődés e memóriatípusnál a gyűrűk méreteinek csökkentésével volt biztosítható, mivel a működési sebesség jelentékenyen megnőtt. A technikai fejlődést a gyűrűk automatikus válogatása, majd a fűzéshez alkalmas célgépek építése jelentette.

A legutóbbi években megjelent publikációk azonban azt jelzik, hogy a ferritmemóriák monopolhelyzete megszűnt, több új memóriatípust dolgoztak ki. Ezek közül legfontosabbként említhetőek a vékony mágneses rétegekből kialakított memóriatípusok. Ezek közül is kettőt kell kiemelni, mégpedig a sík mátrix típusú vékonyréteg memóriát és a huzaltípusú ún. szőtt memóriát.

A Híradástechnikai Ipari Kutató Intézetben közel 5 éve foglalkozunk vékony mágneses rétegekből készült memóriák technológiájának és konstrukciójának kutatásával.

Párologtatás útján előállított sík-memóriák

E tártípus fő előnye a lényegesen nagyobb működési sebesség, ami a kis mágneses tömeg gyors átmágnesezéséből következik. Az átmágnesezési idő 10—30 ns. További előnye a kis teljesítmény igény. A konstrukció fő hátránya azonban a viszonylag kis kivehető jelfeszültség (kb. 1 mV). Ez elsősorban abból adódik, hogy a mágneses tér egy része csak levegőrétegen keresztül záródik.

Üveg és fémlemezre vákuum-párologtatás útján vékony permalloy típusú mágneses rétegeket állítottunk elő, kb. 81% Ni és 19% Fe összetétellel. Tekintettel arra, hogy e két komponens gőztenziója egymástól lényegesen különbözik, ezért olyan párologtatási módszert kellett alkalmazni, amellyel a kívánt összetételt nagy biztonsággal tartani lehet. E feladat a „flash'' típusú párologtatással valósítható meg. Ez esetben a gőzforrás hőmérséklete jóval magasabb, mint a két komponens párologtatási hőmérséklete.

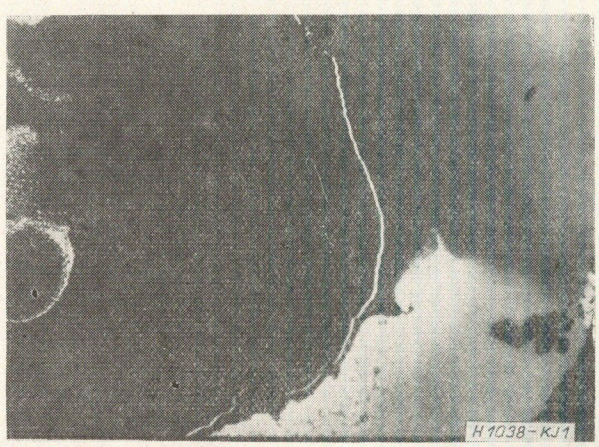
A párologtatás ez esetben pillanatszerű és így megvan a lehetősége annak, hogy a szubsztrátumon keletkező ötvözet összetétele azonos legyen a kiinduló anyagéval. A gőzforrás adagoló rendszere vibrátorral rezegtetett tartályból és hozzátartozó vályúból állt. A tartályból porkeverék vagy esetenként ötvözetreszelék a csónakok egyikére hullott, ahonnan pillanatszerűen elpárolgott.

Ismeretes, hogy a vékony mágneses rétegek anizotróp tulajdonságúak. Van egy irány, amellyel azonos irányú mágnesestér a réteget könnyen mágnesezi, erre merőlegesen helyezkedik el a nehéz mágnesezési irány. A réteg anizotróp tulajdonságait úgy növelhetjük, hogy a réteg előállítása során a párologtatást mágneses térben folytatjuk le. Ezt Helmholtz-tekercscsel biztosíthatjuk. E tekerccsel közel homogén mágneses teret sikerült előállítani, amelynek erőssége kísérleteink során 300 Oe volt. Kb. 1000 Å vastagságú réteget állítottunk elő.

Első feladatunk a rétegek alapvető kémiai és fizikai vizsgálatának lefolytatása volt.

A réteg összetételét röntgen-fluoreszcens spektroszkópiai módszerrel vizsgáltuk. Ennek lényege az, hogy nagyrendszámú elemből (pl. wolframból) készült röntgencső-anódról kiinduló intenzív primer sugárzás útjába helyezett minta felületéről a minta anyagára jellemző szekunder fluoreszcens röntgensugárzás indul meg. A sugárzás analizátor kristályra kerül (pl. LiF), amely 0—120° szögtartományban elforgatható és felbontható komponenseire. A százalékos összetétel a sugárzás intenzitásából állapítható meg, amely szcintillációs számlálóval mérhető.

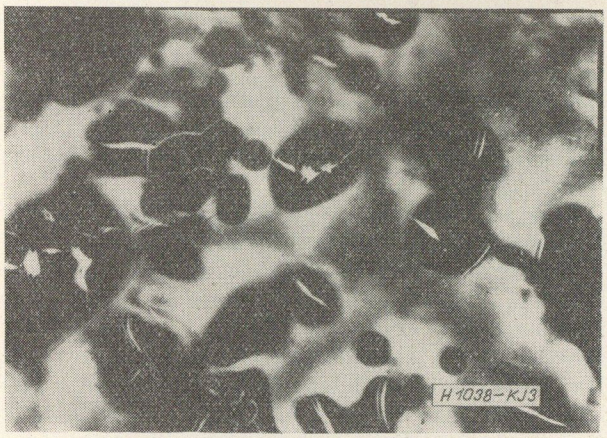
A keletkezett rétegek morfológiáját elektron-mikroszkópos úton vizsgáltuk. A morfológia változását 5 hetes tárolás után is megvizsgáltuk. A vizsgálatot kiterjesztettük nedvestérben történő tárolás esetére is és így megfigyelhettük a réteg korrózióját. E vizsgálatokat különböző összetételű rétegekkel végeztük. Az erről készült elektronmikroszkópos képeket az 1. és 2. ábra mutatja. A vizsgálatok eredménye az volt, hogy legnagyobb korróziós ellenállása a 80% Ni, 20%



1. ábra. 80/20 Ni/Fe összetételű vékony mágneses réteg elektronmikroszkópos képe (nagyítás 15 000×)

Beérkezett: 1970. VI. 9.

2. ábra. 60/40 Ni/Fe összetételű vékony mágneses réteg elektronmikroszkópos képe (nagyítás 15 000×)



3. ábra. Tiszta vasból készült vékonyréteg elektronmikroszkópos képe (nagyítás 15 000×)

Fe összetételű rétegnek van. Azt tapasztaltuk, hogy a vastartalom növekedésével a korrózió erősen növekszik. A tiszta vas korróziós képét a 3. ábra mutatja.

A réteg vastagságát interferencia-mikroszkóppal vizsgáltuk.

A réteg sztatikus mágneses tulajdonságainak vizsgálata volt a következő feladat. E célra hiszterézis-görbe felvevő berendezést építettünk fel. A berendezés oszcilloszkóp ernyőjén mutatta a réteg hiszterézis-karakterisztikáját. A berendezés működési elve a következő: nagyobb méretű tekercs belsejében 1 kHz frekvenciájú, közel homogén mágneses teret állítottunk elő. A tekercsben keletkező mágneses tér erőssége

$$H = k_1 I_0 \sin \omega t$$

Az előbbi tekercs mellett második érzékelő tekercset is elhelyeztünk, amelynek belsejébe a vizsgálandó mágneses réteg került. E tekercsben B mágneses indukcióval arányos Φ fluxus hatására U feszültség indukálódik az érzékelő tekercsben, amelynek nagysága

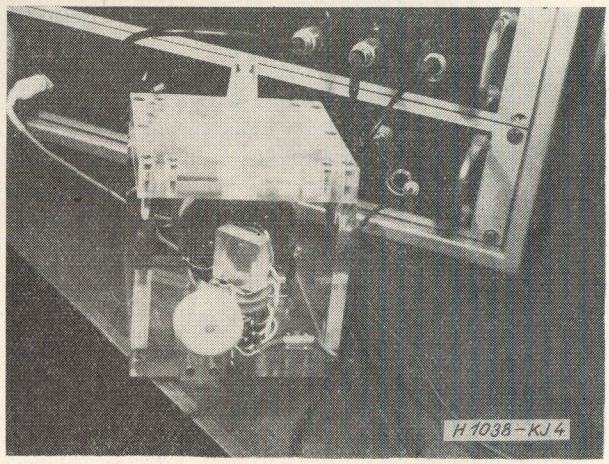
$$U = k_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Ha e feszültséget integráló fokozatba vezetjük a mágneses indukcióval arányos fluxust kapjuk meg:

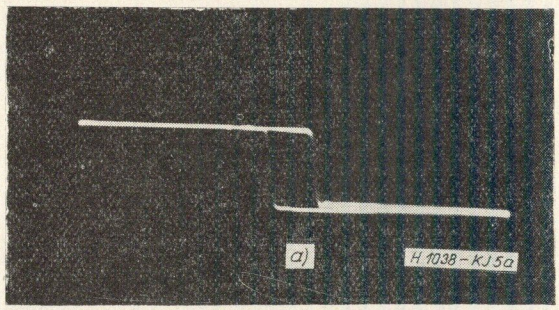
$$\Phi = k_3 \int U dt.$$

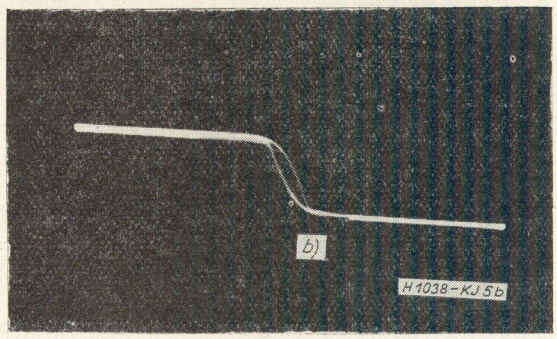
Ha az oszcilloszkóp ernyőjének vízszintes eltérítő lemezére a H térerősséggel arányos I áramot visszük fel, a függőleges eltérítő lemezekre pedig az U feszültséggel arányos Φ, ill. B értéket, akkor az oszcilloszkóp ernyőjén a réteg hiszterézis karakterisztikája jelenik meg.

A berendezéshez speciális tárgyasztal tartozik. Ebben helyezkedik el az érzékelő tekercs. Lehetőség van arra, hogy a vizsgálandó vékony mágneses réteget az értékelő tekercshez képest különböző szögben elforgathassuk. Így a réteg anizotrópia tulajdonságait is vizsgálhatjuk. A tárgyasztal fényképét a 4. ábra mutatja. A 81/19 Ni/Fe összetételű réteg hiszterézis karakterisztikáját a könnyű és nehéz mágnesezési irányba pedig az 5. ábra mutatja. E két mágnesezési irány egymáshoz képest közel 90°-os szöget zár be. A 90°-tól való eltérést a tárgyasztalon elhelyezett szögmérő mutatja. E berendezés hitelesítése után sikerült a síktárak mágneses paramétereit meghatározni, amiket az 1. táblázatban foglaltunk össze.



4. ábra. A hiszterézis karakterisztika felvevő berendezés tárgyasztala





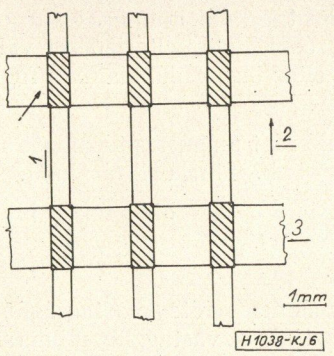
5. ábra. 81/19 Ni/Fe összetételű mágneses réteg hiszterézisi karakterisztikája a könnyű (*a*) és a nehéz (*b*) mágnesezés irányban

Párologtatással előállított sík mágneses rétegek egyes paraméterei *1. táblázat*

Könnyű mágnesezési irányban mért koercitív erő H_{ck} Oe	Anizotrópia H_{ck}/H_{cn}	Telítési indukció B_s Gauss	Nehéz mágnesezési irányban mért koercitív erő H_{cn} Oe	Négyszögesség H_c/H_s	90° szögtől való eltérés
4—4,5	2,0—2,25	7500—8000	2,0	0,9—0,95	5°

H_{ck} a könnyű mágnesezési irányban mért koercitív erő,
H_{cn} a nehéz mágnesezési irányban mért koercitív erő,
H_k anizotropia térerő, mely szükséges ahhoz, hogy a réteget egyik mágnesezési állapotból a másikba átbillenthessük,
B_s a telítési indukció Gauss mértékegységben,
H_s a telítési indukciónak megfelelő térerősség.

A párologtatási kísérletek során sikerült a paraméterek szórását lényegesen csökkenteni. A többszörös ismétlés adatai azt mutatták, hogy a párologtatási technológia jól reprodukálható eredményeket biztosít. A kísérletek során minta-tárak készítését irányoztuk elő. A kísérleti tárat üveglapra felvitt 3 szó, 4 bites mátrix képezte. A szó-vezeték közvetlenül a mágneses réteg felett azzal érintkezve helyezkedett el. A szó-vezeték fotolitografikus úton, 30 μ vastagságú vörösréz fóliából készült. Rögzítése ragasztással történt. A digit-vezeték nyomtatott áramköri lemezen készült, ugyancsak fotolitografikus úton és úgy helyezkedett el, hogy a bit pontok felett keresztezi a szó-vezetéket. Az elrendezést a 6. ábra mutatja.

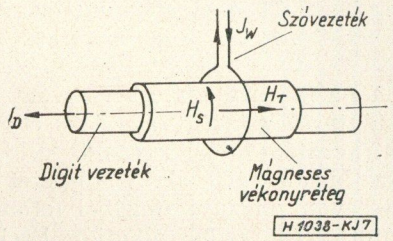


6. ábra. A sík mágneses tár elrendezési rajza a bit és a szóvezetékekkel; 1 — szóvezeték, 2 — könnyű mágnesezési irány, 3 — bitvezeték

Huzal-memóriák

Az 1968. év során elkezdtük az első kísérleteket az elektrolites rétegépítéssel készült huzal-memóriák kidolgozására. A huzalos tárak a legutóbbi 3 év során nagymértékben elterjedtek. Ezeknél a mágneses réteget vékony, nagyszilárdságú fémhuzalra (többnyire berilliumbronz) építik fel, elektrolízis útján. A huzalos tár tárelem-szerkezetét a 7. ábra mutatja. A huzalokon átvezetik a bitáramot, ami a tár konstrukcióját lényegesen leegyszerűsíti. A huzalon átfolyó áram a mágneses rétegen zárt erőteret alkot. Ezért e tárból kivehető jelfeszültség közel egy nagyságrenddel nagyobb, mint az egyszerű sík tárból kivehető. További előnye e tártípusnak, hogy az előállítás folyamatos lehet, szemben a síktár szakaszos előállításával.

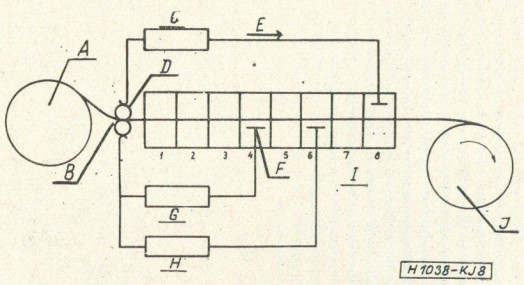
A folyamatos elektrolizáló rendszer sémáját a 8. ábra mutatja. Az első fürdőben a berilliumbronz huzal zsírtalanítása, a második alkoholban, a harmadik pedig desztillált vízben való tisztítása történik. Ezután következik az első galván fürdő, ahol a felületre rézréteget viszünk fel azért, hogy a felület egyenletességét növeljük. A huzal felületének egyenletessége a mágneses réteg fizikai paraméterei szempontjából igen nagy jelentőségű. A felület egyenlőtlensége a mágneses paraméterek helyenkénti romlását okozza.



7. ábra. A huzalos tár egy elemének vázlatos rajza

Ezután újabb mosófürdő következik, majd a második galvánfürdő. Ez a technológia legkényesebb része. Ebben a fürdőben alakítjuk ki a huzalra vitt mágneses réteget. A fürdő Ni és Fe sókból és felületaktiváló anyagokból áll. Az elektrolit összetételét úgy választottuk meg, hogy a Ni és Fe ionok aránya a szubsztrátumon 81/19 legyen. Gondoskodni kell a fürdő összetételének és hőmérsékletének stabilizálásáról. A réteg anizotrópia tulajdonságait a huzalon keresztülvezetett áram mágneses tere biztosítja. Ez a könnyű mágnesezési irányt is egyben megszabja. E fürdő után újabb tisztító fürdő következik.

Az előállított réteg legfontosabb mágneses paramétereit a 2. táblázat ismerteti.

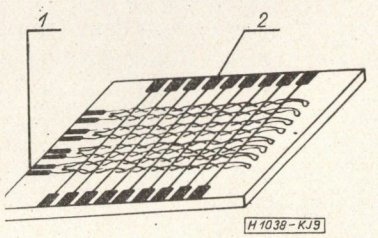


8. ábra. A folyamatos huzal-elektrolizáló berendezés sematikus rajza; *A* — orsó, *B* — katód, *C* — tápegység, *D* — áram hozzávezetés, *E* — előmágnesező áram, *F* — Cu anód, *G* — tápegység, *H* — konstans áramú tápegység, *I* — permalloy anód, *J* — tekercselő mechanizmus, *1* — triklóterilén, *2* — etilalkohol, *3* — desztillált víz, *4* — galvanikus réz felvitel, *5* — desztillált víz, *6* — galvanikus permalloy felvitel, *7* — desztillált víz, *8* — higany kontaktus

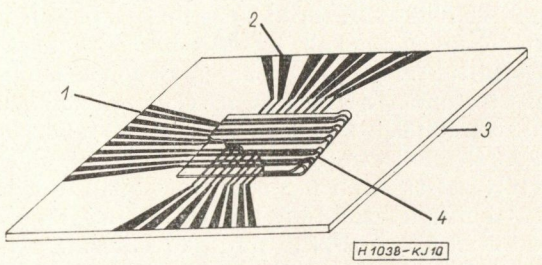
A huzalos tárak mágneses rétegeinek egyes paraméterei *2. táblázat*

Könnyű mágnesezési irányban mért koercitív erő H_{ck} Oe	Anizotrópia H_{ck}/H_{cn}	Telítési indukció B_s Gauss	Nehéz mágnesezési irányban mért koercitív erő H_{cn} Oe	Négyszögesség H_c/H_s	90° szögtől való eltérés
3,5—4,5	1,1—0,85	16 000—18 000	3,2—5,2	0,8—0,85	5°

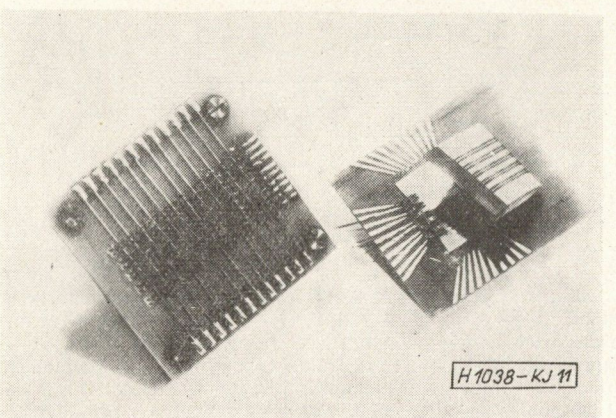
Az elektrolizált huzalokból társíkokat készítettünk. Az egyik tárelrendezésnél az elektrolizált huzalt szigetelő alapú műanyag lemezre szereltük és arra felforrasztottuk az előre elkészített kontaktusok segítségével. A huzalok képezik a tár bit-vezetékeit, míg a szó-vezetékek a bit-vezetékekre merőlegesen szövés útján épülnek fel. Ezt a 9. ábra mutatja. Az ábrán 4 szó 9 bites tárorganizációt láthatunk. A másik tárelrendezésnél a mágneses réteggel bevont huzalokat műanyag távtartó lemezek választják el egymástól. A bit-vezetéket itt is a mágneses réteggel bevont berilliumbronz huzalok képezik. A szó-vezetéket pedig rézfóliával bevont műanyag-fóliából fotolitografikus úton maratott vezető-csíkok alkotják. Ezek a csíkok



9. ábra. A huzalos szőtt tár elrendezési rajza; *1* — szó vezeték, *2* — bit vezeték



10. ábra. A huzalos tár strip-line elrendezéssel; *1* — szó vezeték, *2* — bit vezeték, *3* — alap lemez, *4* — Melinex-fólia



11. ábra. A megvalósított 4 szó, 9 bites huzalos tárak fényképe

burkolatszerűen foglalják magukba a bitvezetékekee a 10. ábra szerint. Ezt az elrendezést strip-lint konstrukciónak nevezik. A megvalósított tárak fényképeit a 11. ábra mutatja.

Elkészítettük e tárak tárelem-vizsgálatára szolgáló berendezést, amely a tárelem legfontosabb dinamikus paramétereinek mérésére szolgál. E dinamikus paraméterek közül a legfontosabb a működési sebességre jellemző ciklusidő és a kivehető hasznos jelfeszültség. A 3. táblázat a huzalos tárak legfontosabb dinamikus paramétereit mutatja.

3. táblázat

Huzalos tárak legfontosabb dinamikus paraméterei

Kiolvasott jelfeszültség mV	Billenési (2×) idő ns
2,3—4,8	120—180

A lefolytatott kísérletek alapján megállapítható, hogy a huzalos táraknak számos, olyan előnyük van, ami alkalmazásuk gyors elterjedését valószínűvé teszi. Ezek az előnyök az alábbiakban foglalhatók összse:

1. A kialakuló zárt mágneses tér miatt a jelfeszültségek nagyobbak, mint a síktáraknál.
2. Konstrukciója egyszerűbb, mivel bit-vezetékként a mágneses réteget tartalmazó huzalt lehet felhasználni.
3. Mivel a mágneses réteg vastagságát 2000—5000 Å-re választják, ez vastagabb, mint a síkmemóriáknál alkalmazott. Az információt tartalmazó mágneses energia arányos a vastagsággal, ezért e lehetőség további jelfeszültség-emelkedést eredményez.
4. A folyamatos előállítás miatt technológiája egyszerűbb, így önköltsége várhatóan kisebb mint a síktáraké.

Egyetlen hátrányként a hőérzékenységet lehet említeni, mivel a jelet átvivő huzal kapcsolatban van a tároló réteggel és a rajta áthaladó áram melegítő hatása hatással lehet a tároló réteg paramétereire is. E hatás mértékét a folyamatban levő megbízhatóság vizsgálatok fogják megállapítani.

IRODALOM

H. E. Maurer: Horizons in Guidance Computer Component Technologie. IEEE Trans. on Comp. Vol. C 17. 1968. júl. 621—634.

G. A. Fedde—C. F. Chong: Plated Wire Memory. IEEE Trans. on Magnetics Vol. 4. 1968. sept. 313—318.

G. A. Fedde: Plated wire. Electronics. 1968. nov. 124—127.

BARTA ERZSÉBET
MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézet

Diffundáltatott Si-minták infravörös sugárzással történő vizsgálatáról

ETO 621.382.001.4 : 621.384.3 : 669.782

A szakirodalomban számos cikk [1—5] foglalkozik vékony rétegek infravörös sugárzással történő vizsgálatával. E vizsgálati módszer több szempontból előnyös és ezért megvizsgáltuk, hogy mennyire alkalmazható hazai viszonylatban. Az ezzel kapcsolatos előtanulmányok és előkísérletek eredményeit tartalmazza a jelen dolgozat.

A félvezető technológiában felhasznált diffundáltatott vékonyrétegek két fontos jellemzője a felületi szabad töltéshordozósűrűség (N_s) és a behatolási mélység (x_j). A behatolási mélység meghatározása ferde csiszolaton történik. A mintán elvégzett 4-tűs mérésből x_j ismeretében, meghatározott eloszlási profil feltételezésével meg lehet határozni a felületi szabad töltések sűrűségét. (Felületi szabad töltéssűrűségen a továbbiakban a felületi vékony rétegben jelenlevő szabad töltéshordozók sűrűségét értjük.) A módszer hátránya, hogy a ferde csiszolat a minta roncsolását jelenti, a mérés tehát nem végezhető el közvetlenül a felhasználásra kerülő szeleten.

Mivel az egyes félvezető anyagok optikai tulajdonságait, a tilossáv szélességének megfelelő hullámhossznál hosszabb hullámhosszú tartományban, főleg a szabad töltések határozzák meg, lehetővé válik az anyagban levő szabad töltések sűrűségének optikai módszerrel történő meghatározása.

A Maxwell-egyenletek és a félvezetőben levő szabad elektronok mozgásegyenletének figyelembevételével, a következő összefüggések írhatóak fel az anyag optikai állandóira [6]:

$$n^2-k^2=n_0^2-\frac{N e^2}{m^* \varepsilon_0 (\omega^2+\tau^{-2})} \qquad (1)$$

$$2nk=\frac{N e^2 \tau^{-1}}{m^* \varepsilon_0 (\omega^2+\tau^{-2}) \omega}$$

n=hullámhossztól függő törésmutató; k=hullámhosszfüggő extinkciós együttható; n_0=tiszta anyag törésmutatója, amely a vizsgált hullámhossztartományban állandó; N=szabad töltések sűrűsége; m^*=szabad töltések effektív tömege; ω=sugárzás körfrekvenciája; τ=relaxációs idő; ε_0=a vákuum dielektromos állandója.

Az anyag reflexióképességének hullámhossz-függését az optikai állandók szabják meg:

$$R=\frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2} \qquad (2)$$

R=az anyag reflexióképessége merőleges beesés esetén. (A merőlegestől eltérő beesési szög esetén (2) szögfüggő tagokat is tartalmaz.)

Beérkezett: 1970. III. 28.

A reflexióképesség hullámhosszfüggését vizsgálva következő összefüggést kapjuk a reflexióban fellépő minimum helye és a szabad töltések sűrűsége között [6]:

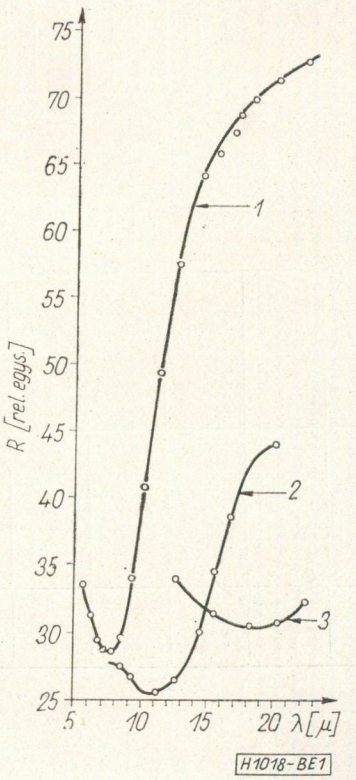
$$N=\frac{m^* \varepsilon_0 \omega_{\min}^2 (n_0^2-1)}{e^2} \qquad (3)$$

A reflexióképességben fellépő minimumból tehát meghatározható a szabad töltések sűrűsége.

A kísérleteknél használt minták reflexióképességének vizsgálatát Zeiss-gyártmányú UR10 infravörös spektrofotométeren végeztük, a gyártó cég által készített reflexiós feltéttel.

Elsőként, növesztés közben, homogénen szennyezett n- és p- típusú Si-szeletek reflexiós spektrumát vettük fel. Az ezekben a spektrumokban jelentkező $\lambda_{\min}$-adatok (1. ábra) segítségével meghatározott töltéshordozó sűrűségek jól egyeztek a 4-tűs módszerrel meghatározott értékkel (1. táblázat).

A diffundáltatott rétegek felületi szabad töltéssűrűségét azonban nem lehet minden esetben egyedül a reflexiós minimum helyzetéből meghatározni. Ennek oka a következő:

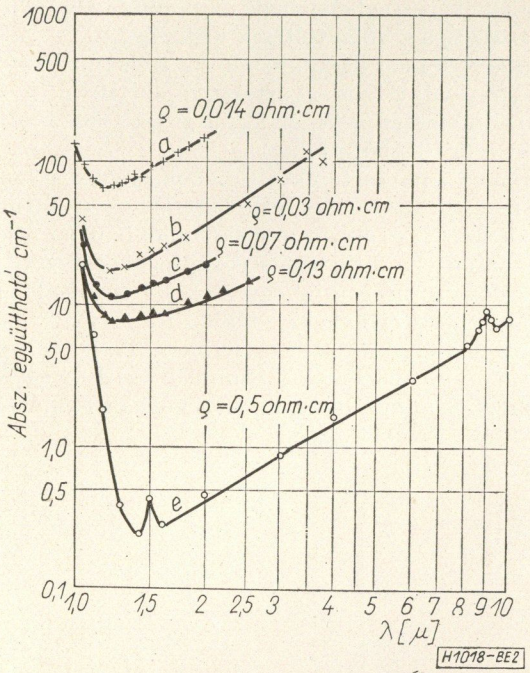


1. ábra. Növesztés közben, homogénen szennyezett n-típusú Si-szeletek reflexióképességének hullámhosszfüggése: 1—$N=4\times10^{19}$ cm^{-3}; 2—$N=2{,}2\times10^{19}$ cm^{-3}; 3—$N=4{,}5\times10^{18}$ cm^{-3}

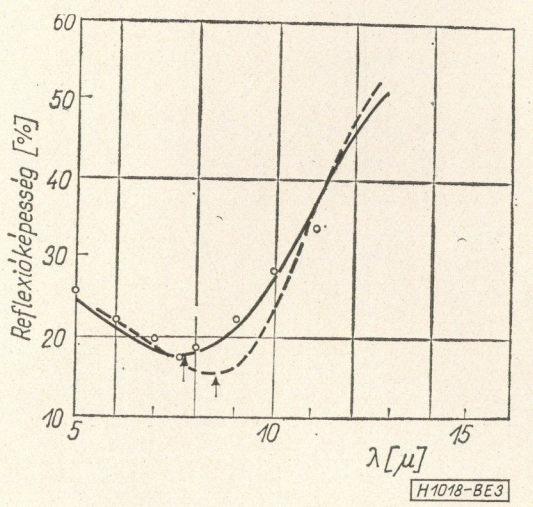
1. táblázat

4-tűs módszerrel meghatározott N [cm^{-3}]	Reflexiós minimumból meghatározott N [cm^{-3}]
6×10^{19}	$5{,}5 \times 10^{19}$
4×10^{19}	$4{,}5 \times 10^{19}$
$2{,}2 \times 10^{19}$	$2{,}2 \times 10^{19}$
$4{,}5 \times 10^{18}$	$4{,}5 \times 10^{18}$

A félvezető anyag abszorpciós együtthatója és így a sugárzás behatolási mélysége függ az anyagban jelenlevő szabad töltések sűrűségétől és a hullámhossztól (2. ábra).



2. ábra. p-típusú Si abszorpciós együtthatójának hullámhosszfüggése Spitzer és Fan [7] alapján

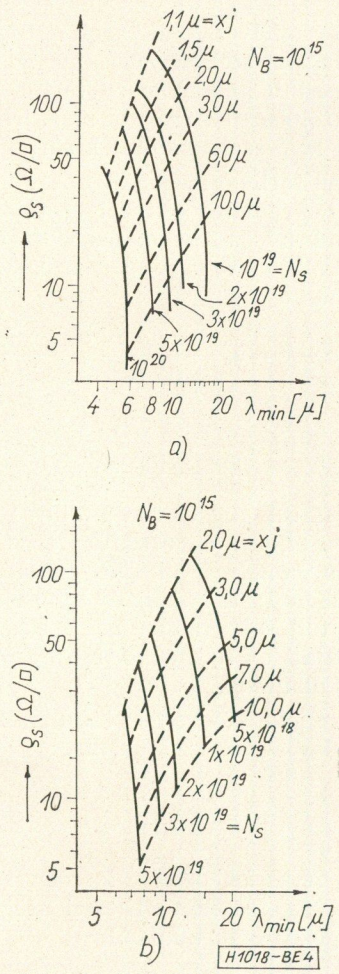


3. ábra. A reflexiós minimum helyzete homogénen szennyezett minta esetén (szaggatott görbe) és diffundáltatott réteg esetén (folytonos görbe). A homogénen szennyezett minta szabad töltéssűrűsége megegyezik a diffundáltatott minta szabad töltéssűrűségével, ennek ellenére a két minta λ_{min} adata különbözik (Abe és Nishi [5] nyomán).

Diffundáltatott rétegekben a szabad töltések száma a felülettől számított mélység függvényében változik. Ahhoz, hogy a reflexiós minimumhoz tartozó hullámhosszból, magából, egyértelműen megállapítható legyen a felületi szabad töltések sűrűsége, az szükséges, hogy az infravörös sugárzás behatolási mélységéig a szabad töltések sűrűsége ne különbözzék a felületi sűrűségtől. Ez konkrét példán szemléltetve a következőt jelenti:

Ha a felületi szabad töltés sűrűsége 10^{19} cm^{-3}, a reflexiós minimum 15,5 μm-nél jelentkezik, ahol az abszorpciós együttható értéke 5000 cm^{-1}, a behatolási mélység tehát 2 μm. A reflexiós minimum helye csak abban az esetben adja meg a felületi szabad töltéssűrűséget, ha ennek értéke a felülettől számított 2 μm-ig állandó, ellenkező esetben a reflexiós minimum helye eltolódik (3. ábra).

Abe és Nishi [5] 1968-ban megjelent cikkükben rámutattak arra, hogy a felületi szabad töltések sűrűsége és a behatolási mélység, adott, monoton csökkenő eloszlási függvény esetén, a mintának az infravörösben felvett reflexiós spektrumában és a mintán elvégzett 4-tűs mérésből egyértelműen meghatározható. A diffundáltatott Si-réteget folytonosan változó törésmutatóval rendelkező többréteges közegként kezelve, Gauss-, ill. erfc-eloszlást feltételezve, egzaktul kiszámították az egyes felületi szabad töltés sűrűségekhez tartozó minimumok helyét. Az így kapott



4. ábra. Számolt ϱ_S—λ_{min}—x_j—N_S—függések
a) — erfc-eloszlás; *b)* — Gauss-eloszlás esetén (Abe és Nishi [5] nyomán)

eredményeket vetették össze Irwin [8] hasonló jellegű számításaival, amelyek adott felületi szabad töltéssűrűséghez fajlagos vezetőképesség adatokat rendeltek. A két számítás összevetése a következő két görbesereget eredményezte (4. ábra).

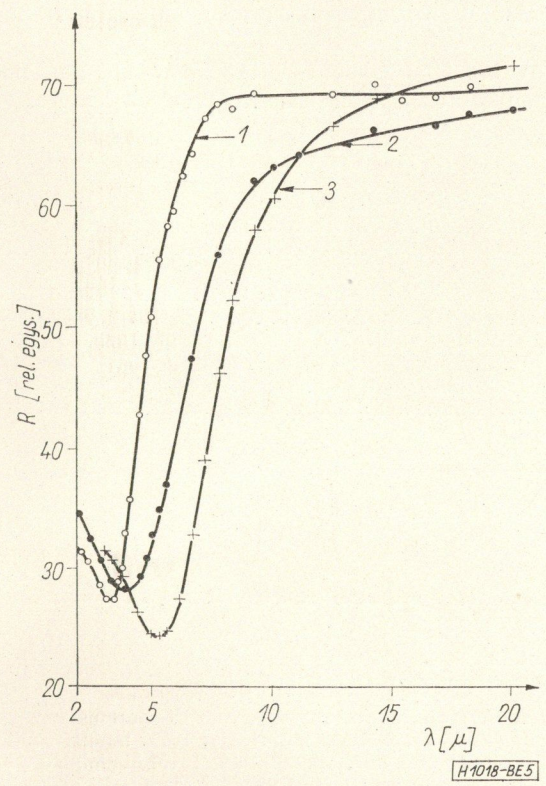
Munkánk célja az volt, hogy a fent ismertetett módszer alkalmazhatóságát megvizsgáljuk és kibővítsük a hazai igényeknek megfelelően. Elsőként a cikkben közölt paraméterekkel rendelkező Si-mintákat vizsgáltunk. A reflexiós spektrumok jól értékelhető éles minimumokat mutattak, mint azt az 5. ábrán példaként kiragadott három spektrum szemlélteti; ezen minták adatait a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

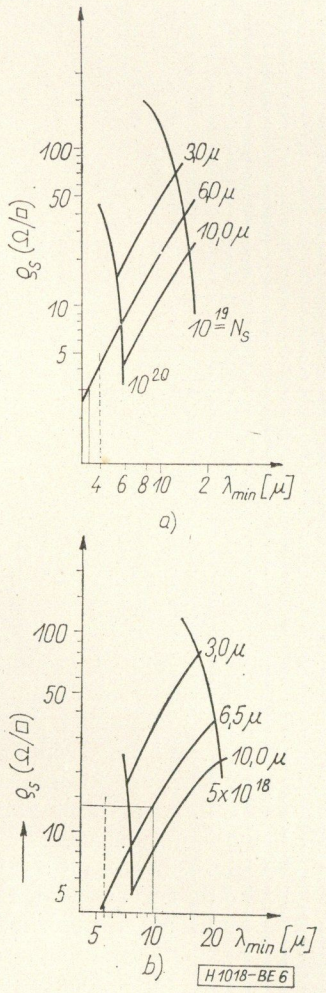
Minta	Diff. szennyező	ϱ_s [Ω/□] (4 tűs mérés)	x_j [μ] (ferdecsiszolat)
1	P	6,1	4,2
2	P	11,2	1,6
3	P	3,0	6,0

Az általunk mért minimumok azonban nem egyeznek meg az Abe és Nishi által közölt adatokkal. A feltételezett Gauss-eloszlás esetén az általunk mért minimumok rövidebb hullámhossznál jelentkeznek, míg a feltételezett erfc-eloszlás esetén hosszabb hullámhossznál (6. ábra).

Feltéve, hogy a mérések x_j-t, ϱ_s-t és λ_{min}-t egyértelműen és kellő pontossággal meghatározzák, azt várjuk, hogy a három adat egyértelműen meghatározza N_s-t. A mérések ezt a várakozást nem elégítették ki (6. ábra).



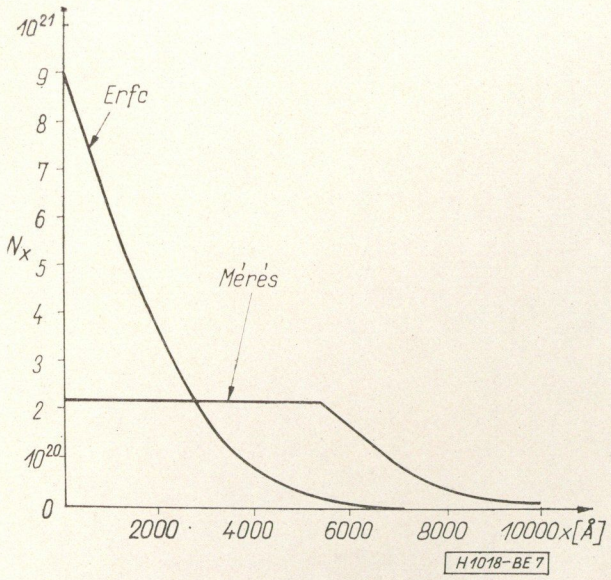
5. ábra. Diffundáltatott Si-mintákon mért reflexiós spektrumok



6. ábra. Részlet a 4. ábrából saját mérési adatokkal (szaggatott vonal) kibővítve: *a)* — mért $\varrho_S = 3\,\Omega/\square$, mért $x_j = 6{,}0$ μm, mért $\lambda_{min} = 4$ μm, *b)* — mért $\varrho_S = 13\,\Omega/\square$, mért $x_j = 6{,}5$ μm, mért $\lambda_{min} = 9{,}6$ μm

Mivel a mérési adatok kielégítően pontosak ($\Delta x_j = \pm 10\%$, $\Delta\varrho_S = \pm 15\%$ és $\Delta\lambda_{min} = \pm 6\%$), arra kell következtetnünk, hogy az Abe és Nishi által felállított feltételek a mi mintáink esetén nem teljesülnek. Ha pl. az általunk mért mintáknál a diffúziós profil erősen eltér az Abe és Nishi által feltételezett Gauss-, ill. erfc-eloszlástól, nem várható az irodalmi adatokkal való egyezés. A P-diffúziónál ideális esetben meghatározott diffundáltatási körülmények mellett a diffúziós profil erfc-eloszlású. A valóságban azonban számtalanszor észlelnek a 7. ábrához hasonló eloszlást.

Habár az eloszlási függvény alakja igen erősen eltér az ideálistól és a felületi szabad töltéssűrűségben is igen nagy az eltérés, a két integrál alatti terület közel azonos. Mivel a 4-tűs mérés alapján meghatározott fajlagos vezetőképesség $(\varrho_s)^{-1}$ nem magával a felületi szabad töltéssűrűséggel, hanem egy $N_s\int f(x)e\mu dx$ típusú integrállal arányos (ahol $f(x)$ az eloszlási függvény, μ a szabad töltésekre jellemző mozgékonyság, e az elemi töltés), feltehetjük, hogy nem annyira érzékeny N_s-nek és $f(x)$-nek az elvben feltételezett értékektől való egyidejű eltérésére. Ez a 7. ábrához hasonló eloszlás esetén azt jelentené, hogy a ϱ_s segítségével meghatározott N_s-adat a valódi felületi sza-



7. *ábra.* Ideális erfc- és mért diffúziós profil. P-diffúzió esetén (Tannenbaum [9] nyomán)

bad töltéssűrűségnél nagyobb. A 6*a* ábrából kitűnik, hogy feltételezett erfc-eloszlás esetén az általunk mért λ_{min} hosszabb hullámhossznál jelentkezik, mint ahogy azt a (ϱ_s, x_j) metszéspont megszabná, tehát a (λ_{min}, x_j) metszéspont kisebb töltéssűrűséget indikál, mint az előbbi. Ez alátámasztani látszik azt az elképzelést, hogy az optikai mérés érzékenyebb a valódi szabad töltéssűrűségre, mint a 4-tűs mérés.

A felületi szabad töltéssűrűségnek a 4-tűs mérésből való meghatározása még azt a hibalehetőséget is magában rejti, hogy a számolásnál felhasznált mozgékonysági adat bizonyos töltéssűrűség felett kevéssé ismert. Ha a feltételezett mozgékonyságadat a valódinál nagyobb, úgy a 4-tűs méréshez hozzárendelt N_s-adat kisebb a valódinál. Ebben az esetben a reflexiós minimum az irodalmi értéknél rövidebb hullámhossznál jelentkezne, mint a 6*b* ábrán. Mivel azonban a mozgékonyság várható változása a sűrűséggel nem olyan számottevő, mint a 6*b* ábrán látható eltérés, a mozgékonyságadatból eredő hiba nem lehet az eltérés kizárólagos oka.

A fentiekben ismertetett előkísérletek tehát azt mutatták, hogy homogénen szennyezett Si-minták esetén az infravörös technikával meghatározott szabad töltéshordozó sűrűség jól egyezik a 4-tűs módszerrel meghatározott értékekkel. A rendelkezésünkre álló Zeiss-gyártmányú UR—10 spektrofotométer 2,5—20 μm-ig használható. Ez azt jelenti, hogy *n*-típusú Si esetén

$$4{,}5\times10^{18}\leq N_n\leq 9{,}4\times10^{20}\ \text{cm}^{-3}$$

p-típusú Si esetén pedig

$$5{,}8\times10^{18}\leq N_p\leq 6{,}8\times10^{20}\ \text{cm}^{-3}$$

határok között határozható meg a szabad töltéssűrűség.

A diffundáltatott Si-rétegeken végzett méréseink eredménye azonban nem egyezik az irodalmi adatokkal. Feltételezzük, hogy ennek egyik oka az, hogy a mért mintákban a diffuziós profil eltér az irodalomban feltételezett ideális Gauss-, illetve erfc-eloszlástól. További hibalehetőséget látunk a számításokban előforduló mozgékonyságadat valódi értékének hiányos ismeretében. Az ellentmondások okainak felderítésére és egyben feltevéseink ellenőrzésére olyan optikai mérést tartunk alkalmasnak, amely más mérésektől függetlenül csak a felületi szabad töltéshordozó sűrűségre ad felvilágosítást. Ilyen mérés a diffundáltatott rétegnek a besugárzása olyan hullámhosszú sugárzással, amelynek a behatolási mélysége nem haladja meg a felülettől számított azon távolságot, amelyen belül a szabad töltések eloszlása még homogénnek mondható. A szabad töltéshordozók száma ui. nemcsak a reflexiós minimum helyzetét szabja meg. Minden $\lambda_{gap}<\lambda$ esetén érvényes a következő összefüggés [1]:

$$N=\frac{\omega^2\, m^*\,(k^2-n^2+n_0^2)\,\varepsilon_0}{e^2} \qquad (4)$$

A reflexióképesség két különböző szög alatt való abszolút mérése lehetővé teszi n és k és így N meghatározását is. Ez az N csak vékony felületi rétegre lesz jellemző. Ezzel kapcsolatban már folynak előtanulmányok.

További lépést jelentene Abe és Nishi adatainak kibővítése konkrét eloszlási függvények esetére.

IRODALOM

1. *W. G. Spitzer—H. Y. Fan:* Phys. Rev. *106*/3,882, 1957.
2. *I. Kudman:* J. Appl. Phys. 34/b, 1826, 1963.
3. *H. D. Riccius—G. Ulbricht:* Z. Angew. Phys. *19*, 203, 1965.
4. *E. E. Gardner* et al.: Appl.: Phys. Lett. *9*, 432, 1966.
5. *T. Abe—Y. Nishi:* Jap. J. Appl. Phys. 7/4, 397, 1968.
6. *T. S.* Moss et al.: Proc. Phys. Soc., ser 2, *1*, 1435, 1968.
7. *W. G. Spitzer—H. Y. Fan:* Phys. Rev. *108*/2, 268, 1957.
8. *J. C. Irwin:* Bell Syst. Techn. J. *41*, 387, 1962.
9. *E. Tannenbaum:* Sol. St. Electr. *2*, 123, 1961.

Nemzetközi Szimpózium az elektromágneses térelméletről

A szimpóziumot a Nemzetközi Rádió Tudományos Unio (URSI) szovjet tudományos intézményekkel együttműködve 1971. szeptember 9—15. között rendezi meg.

A szimpózium a következő kérdésekkel foglalkozik:

1. Elektromágneses hullámok terjedése közegekben
2. Aszimptotikus módszerek a diffrakció elméletben
3. Optikai módszerek
4. Numerikus módszerek és számítógépek alkalmazása
5. Antennák
6. Nemlineáris és parametrikus jelenségek

A konferencia hivatalos nyelve angol és francia.

Az előadások beküldési határideje: 1971. március 1.

A szimpóziummal kapcsolatban további felvilágosítást dr. Géher Károly ad (BME Vezetékes Híradástechnika Tanszék XI. Stoczek u. 2. II. 212. Tel. BME 24—28. m.), az URSI MNB titkára.

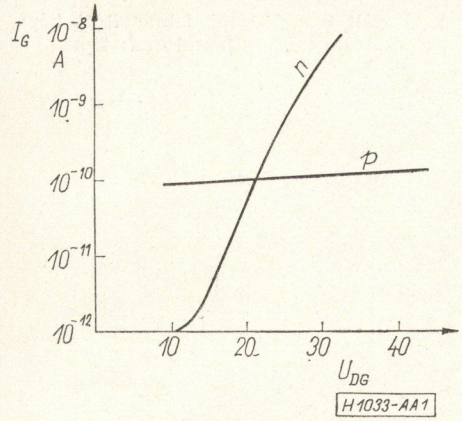
DR. AMBRÓZY ANDRÁS
BME Elektroncsövek és félvezetők tanszék

Térvezérlésű tranzisztorok vezérlőelektróda árama

ETO 621.382.323.014.145

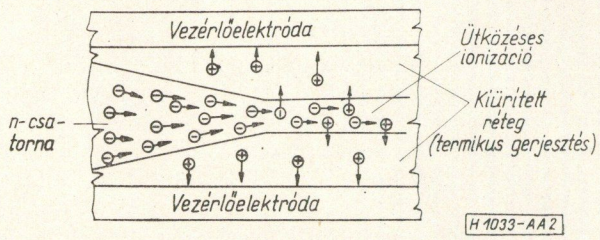
Nemrégiben több közlemény [1—4] foglalkozott a záróréteges térvezérlésű tranzisztorok vezérlőelektróda áramának, illetőleg MOS tranzisztorok szubsztrátum áramának nagy kollektorfeszültségeknél tapasztalható anomáliájával. A különböző szerzők által végzett kísérletek eredményei mindazonáltal eltérnek egymástól, s még inkább eltér a hozzájuk fűzött magyarázat. Fowler [1] megfigyelte, hogy az elzáródási tartományban közepesen nagy kollektorfeszültségeknél az *n*-csatornás eszközök vezérlőelektróda-árama közelítőleg lineáris kapcsolatban van a kollektorárammal, és rohamosan növekszik a kollektorfeszültség növelésével. Ugyanezt a jelenséget *p*-csatornás eszközök nem mutatták, legalábbis szobahőmérsékleten és afölött (1. ábra).

Ryan [2] alacsony hőmérsékleten vizsgálta a vezérlőelektróda-áram kollektorárammal arányos komponensét, és létezését kimutatta *p* típusú germániumban, valamint *n* és *p* típusú szilíciumban. Az I_G/I_D áramarányt az I_D kollektoráram széles tartományában közelítőleg állandónak találta, feltételezve, hogy U_{DG}=állandó. Méréséhez impulzus alakú tápfeszültségeket használt az eszközök felmelegedésének elkerülése végett. Sajnos, ez a módszer kevésbé pontos, különösen akkor, ha a kollektor-vezérlőelektróda kapacitás miatt fellépő tranzienseket is figyelembe kell venni. Ez különösen kicsiny vezérlőelektróda-áramoknál zavaró. Ilyen esetekben egyébként a munkaponti igénybevétel az eszközt nem melegíti észrevehetően.



1. ábra. *n* és *p* csatornás térvezérlésű tranzisztor vezérlőelektróda-árama

Az eszköz lehűtésével a termikusan gerjesztett kisebbségi töltéshordozók száma rohamosan csökken. A megmaradó, és a kollektorárammal közel arányos komponensre Ryan [2, 4] és Nakahara [3] feltételezi, hogy azt az elzáródott csatornaszakaszban maximális driftsebességgel mozgó [5] többségi töltéshordozók ütközéses ionizációja váltja ki (2. ábra). Ha ez így van, akkor I_G szóban forgó komponense és I_D között szigorúan lineáris kapcsolatnak kell lennie, amennyiben az ütközéses ionizáció valószínűsége állandó. Ennek igazolására, valamint a vezérlőelektróda-áram különböző komponenseinek szétválasztására külön e célra tervezett, kifinomult kísérleti technika vált szükségessé.



2. ábra. Termikus gerjesztéssel és ütközéses ionizációval keletkező kisebbségi töltéshordozók

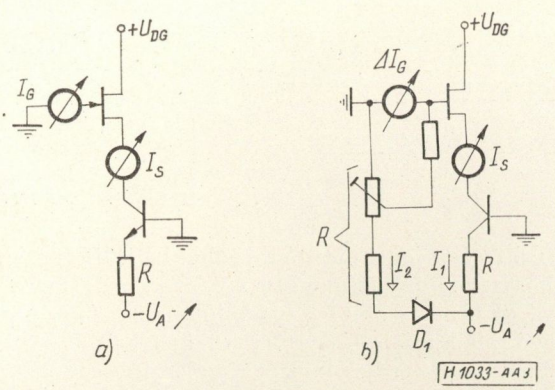
Mérési összeállítás

Minthogy az I_D kollektoráram a független változó ennek nem szabad függenie a tápfeszültségektől, környezeti hőmérséklettől stb. Méréseinkhez igen egyszerű felépítésű és szabályozható, állandó áramú áramforrást választottunk: *n*-csatornás eszközökhöz *npn*, *p*-csatornásakhoz *pnp* bipoláris szilícium tranzisztorokat használtunk, földelt bázisú kapcsolásban (3. ábra). Kivéve az $U_{GS}=0$ ($I_D=I_{DSS}$) esetet, a bipoláris tranzisztor kollektor-bázis átmenete kellő záróirányú előfeszítést kap, de még $U_{CB}=0$ előfeszítésnél is elegendően nagy marad a bipoláris szilícium tranzisztor kimenő ellenállása. Ha különlegesen nagy kimeneti ellenállás szükséges (teljes függetlenség U_{GS}-től) térvezérlésű és bipoláris tranzisztorból felépített kombinációt [6] használhatunk.

A vizsgálandó vezérlőelektróda-áramkomponens igen meredeken emelkedik az U_{DG} kollektorfeszültséggel. Emiatt a kollektor és vezérlőelektróda hozzávezetéseken eső feszültségeket a lehető legkisebbre kell csökkenteni. A kollektorkörben pl. igen kis ellenállású árammérőt kell alkalmazni, illetve még helyesebb az I_S emitteráramot mérni I_D helyett, minthogy $I_G \ll I_D$ (3*a* ábra).

Az I_D forrásáramot egy külső feszültségforrás feszültségének szabályozásával állíthatjuk be. Ugyanez használható I_G kompenzálására is; a 3*b* ábrán a ΔI_G műszer az I_D-I_G kapcsolatnak csupán a linearitástól való eltérését mutatja. Emiatt a műszeren eső feszültség is O, illetőleg elhanyagolhatóan kicsiny. A D1 dióda biztosítja az I_1-U_A és I_2-U_A karakterisztikák hasonlóságát.

Beérkezett: 1970. V. 8.



3a ábra. Áramkör a vezérlőelektróda-áram mérésére
3b ábra. A vezérlőelektróda-áram kompenzálása

Kísérleti eredmények

Először az I_{GS} és I_{GD} vezérlőelektróda-csatorna áramkomponenseket vizsgáltuk (az indexben nem jelölt elektróda szakadásban) szobahőmérsékleten, különböző előfeszítésekkel, annak ellenőrzésére, hogy a tranzisztor szerkezete szimmetrikus-e, vagy sem. Néhány tranzisztor kis aszimmetriát mutatott, feltehetően a felületi átvezetés aszimmetriája miatt, de még ezeknek az elzáródási feszültsége sem változott meg a kollektor és emitter szerepének felcserélésével. Ez a térfogati struktúra szimmetriáját igazolja. Két tipikus struktúrát mutat a 4. ábra.

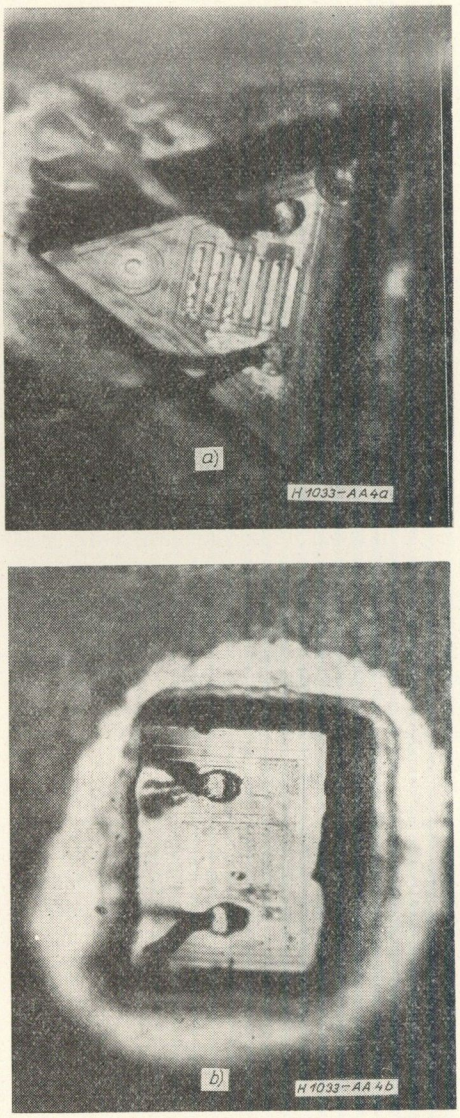
Az 5. ábrán n és p csatornás eszközök jellegzetes $\log I_G - \log I_D$ karakterisztikáit láthatjuk szobahőmérsékleten felvéve. A szóródó mérési eredményeket legjobban megközelítő egyenes vonalakat is berajzoltuk. Az n-csatornás eszközökre az összefüggés lineáris, a p-csatornásokra azonban az

$$I_G = cI_D^m \qquad (1)$$

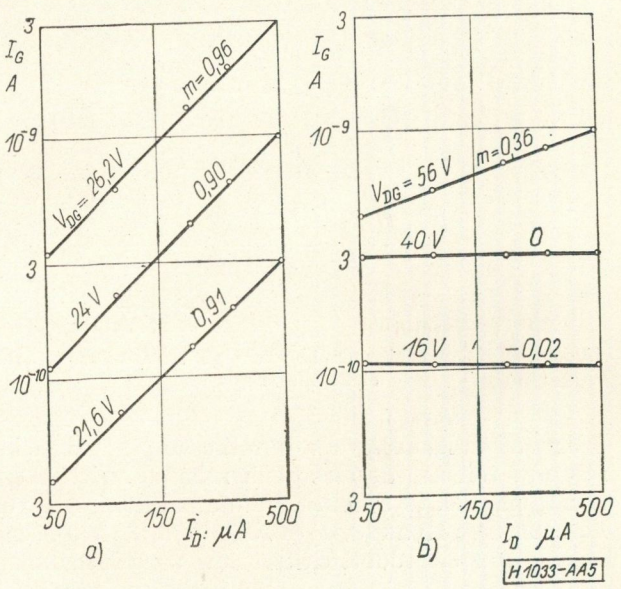
összefüggés érvényes (legalábbis I_D egy dekádnyi tartományában), ahol az m kitevő kicsiny negatív értéktől kb. +0,5-ig változik U_{DG}-től függően. Ebből világosan látható, hogy p-csatornás eszközökben szobahőmérsékleten az I_G kollektoráramtól függő komponense csak igen nagy térerősségeknél jelentkezik és I_G nagyobbrészt termikusan gerjesztett kisebbségi töltéshordozókból áll.

A tranzisztor lehűtésével I_G termikusan gerjesztett összetevője rohamosan csökken, míg a másik fokozatosan növekszik. A 6. ábra jellegzetes $I_G/I_D - T$ görbéket mutat. Valamennyi görbe $I_D = 0{,}5$ mA-hez tartozik; az (1) egyenletből $50\ \mu A < I_D < 500\ \mu A$ tartományra számított m kitevőket is feltüntettük. $\log I_G I_D - \log T$ jól közelíthető egyenes vonalakkal, melyek meredeksége tranzisztorról tranzisztorra kismértékben különbözik, de jelentős különbséget találunk az n-csatornás ($-2{,}7 \ldots -3{,}7$) és a p-csatornás ($-1{,}4 \ldots -2{,}6$) eszközökre vonatkozó meredekségek között.

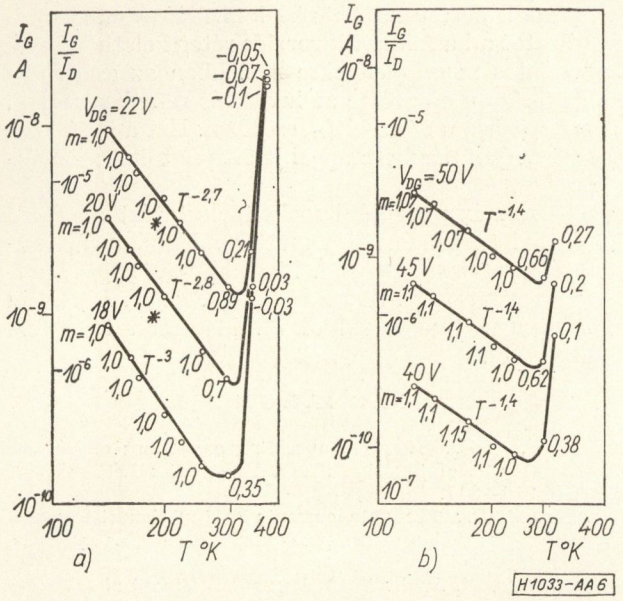
Egyes esetekben, amikor U_{DG} nem volt a lehűtés alatt kikapcsolva, az n-csatornás eszközök vezérlő elektróda-árama csökkent, U_{GS} feszültségük pedig növekedett -20 °C alatt (jellegzetes pontok csillaggal jelölve a 6*a* ábrán). Figyelembe véve a 3*a* ábrát, U_{GS} irreguláris növekedése állandó I_D mellett csak



4. ábra. A vizsgált tranzisztorok felnagyított képe, *a* — n-csatornás; *b* — p-csatornás típus

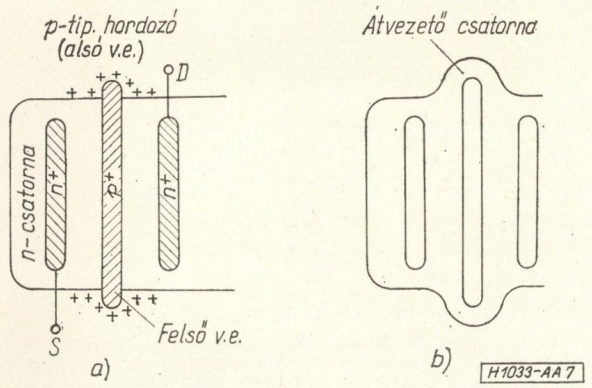


5. ábra. A vezérlőelektróda-, és kollektoráram kapcsolata, *a* — n-csatornás; *b* — p-csatornás eszköz esetén



6. ábra. I_G/I_D hőmérsékletfüggése, *a* — *n*-csatornás; *b* — *p*-csatornás eszköz esetén

akkor lehetséges, ha a kollektor és emitter között átvezetés keletkezik. A planár eljárással készített tranzisztor oxidált felületén rendszerint pozitív szennyező ionok vannak, amelyek mozgékonysága a hőmérséklettől függ; ha ezek a vezérlőelektróda körül kialakuló nagy elektromos tér következtében összegyülekeznek, és a csökkenő hőmérséklet mozgékonyságukat csökkenti („befagynak"), *n*-típusú inverziós réteg keletkezhet az oxid alatt a félvezető felületén, átvezetést okozva az emitter és kollektor között (7. ábra).



7. ábra. a — elektródelrendezés és pozitív töltések a felületen; *b* — a töltések okozta átvezető csatorna az oxidréteg alatt

Egyetlen *p*-csatornás eszköz sem mutatta ezt a rendellenességet, ebből egyfajta szennyező jelenlétére következtethetünk.

Következtetések

Az a tény, hogy az I_G/I_D (T, U_{DG}) összefüggés menete mindkét vezetési típusú térvezérlésű tranzisztorra hasonló (6*a* és 6*b* ábra), nem támasztja alá Fowler [1] elméletét, amely szerint az anomális vezérlőelektróda-áramkomponens oka lyukak emissziója a kollektorból a csatornába. Ez valószínűtlennek látszik [7], minthogy az erős *n*-szennyezettségű kollektor elektródban a kisebbségi hordozók sűrűsége sokkal kisebb, mint a csatornában. A szóban forgó áramkomponens negatív hőmérsékleti tényezője szintén ellentmond az emissziós elméletnek. Nincs továbbá magyarázat az *n* és *p*-csatornás eszközök szobahőmérsékleten mutatkozó különböző viselkedésére (1. és 5. ábra).

Feltéve, hogy a Ryan [2] által javasolt ütközési ionizációs modell némi kiegészítések után helytálló, próbáljuk a kísérleti eredmények magyarázatát adni. A 6. ábra világosan mutatja, hogy mindkét vezetési típusú eszköz vezérlőelektróda-árama legalább két komponensből áll: I_{G1} (negatív hőmérsékleti tényezői az ütközési ionizációnak, I_{G2} (pozitív hőmérséklettényező) pedig termikus gerjesztésnek tulajdonítható. Szobahőmérsékleten és U_{DG} kicsiny értékeinél $I_{G2} \gg I_{G1}$ *p*-csatornás eszközökben. Az 5*b* ábrán $U_{DG}=16$ V-nál, $T=300$ Kelvin-fokon (és hasonlóképpen *n*-csatornás eszközökön 370 Kelvin-fokon, lásd 6*a* ábra) megfigyelhető csekély negatív iránytangens a kiürített réteg térfogatváltozásának következménye. Feltéve, hogy a kisebbségi hordozók termikusan gerjesztődnek a kiürített rétegben, I_D növekedése növekvő csatorna térfogattal és így csökkenő kiürített réteg térfogattal jár együtt. Másrészt I_{G1} kollektoráramfüggése $U_{DG}=56$ V-nál túlkompenzálja I_{G2}-t.

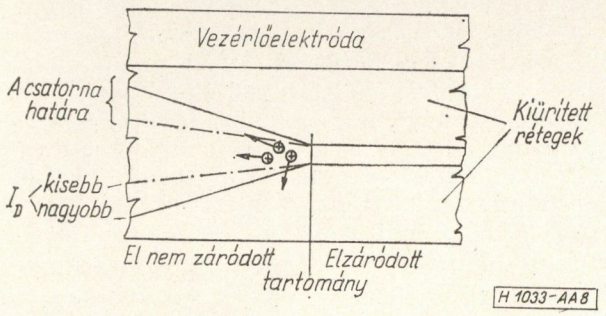
A 6. ábra szerint $I_{G1}=\text{konst.}T^{-s}$, ahol $s_p \neq s_n$. Feltételezhető, hogy ez a különbözőség adalékul szolgálhat a kristályrács és a telítési sebességgel mozgó többségi töltéshordozók kölcsönhatásának alaposabb felderítéséhez. Mivel a lyukak mozgékonysága és telítési sebessége kisebb, mint az elektronoké, az ütközéses ionizáció valószínűsége kisebb, ami magyarázatot ad I_{G1} kisebb részarányára *p*-csatornás eszközök szobahőmérsékleten mért vezérlő elektróda-áramában.

Ha az elzáródott csatorna mentén a térerősség konstans és ismert lenne, az I_G/I_D hányados közvetlenül adná az

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{B}{E^2 l^2(T,E)}\right) = \alpha(T,E) \qquad (2)$$

ionizációs valószínűség (Gunn [8]) hőmérséklet-, és térerő függését jóval a letörési tartomány alatt. Itt A és B anyagi állandók (elektronokra és lyukakra különböző értékűek) és l a két ütközés közötti közepes szabad úthossz. A (2) összefüggést egyelőre csak a letörési tartományban sikerült kísérletileg igazolni, mivel a driftsebességhez tartozó térerősségnél α még olyan kicsiny, hogy a szokványos módszerekkel nem lehet megmérni. Jelen esetben viszont a csatorna tengelyére merőleges tér gyűjti össze az ionizációval keltett kisebbségi hordozókat s ezek áramát egy független elektródon lehet mérni. Valamennyi ütközési ionizációval keltett kisebbségi töltéshordozónak megvan ugyanis az esélye arra, hogy elhagyja az elzáródott csatornát rekombináció nélkül, minthogy a csatornahossz néhány mikron nagyságrendű és a sodródási sebesség mintegy 10^7 cm/s; a futási idő nagyságrendje tehát 10^{-10} s, jóval kisebb, mint a hordozó átlagos élettartama.

A sok elméleti és kísérleti próbálkozás ellenére a térvezérlésű tranzisztorokban kialakuló térerő eloszlás kiszámítása mind ez ideig nem sikerült. A vezérlő elektróda áramának gondos vizsgálata e probléma más úton való megközelítését eredményezheti. Az alacsony hőmérsékleten megfigyelt eltérés $m=1$-től valószínűleg összefüggésben van a csatornageometriájával. Tegyük fel, hogy a térerősség elegendően nagy ütközési ionizáció létrehozására, mielőtt a többségi töltéshordozók elérik az elzáródott csatornaszakasz „bejáratát" (8. ábra). Ebben az összeszűkülő tartományban keletkező kisebbségi töltéshordozók akár a vezérlő elektródra, akár az emitterre eljuthatnak. Kisebb I_D-hez szűkebb el nem záródott csatornaszakasz tartozik, így egyszerű geometriai okoknál fogva csökken a valószínűsége annak, hogy a kisebbségi hordozók az emitterre jussanak. Emiatt a vezérlő elektróda-áram megnövekszik, $m>1$.



8. ábra. A csatornageometria változása a kollektoráram függvényében

Az itt ismertetett ütközési ionizációs modell magyarázatot ad a felületi inverziós réteg keletkezésével kapcsolatos megfigyelésekre is. Ebben az esetben a kollektoráram egy része az inverziós rétegben folyik, a csatornaáram és ezzel I_{G1} csökken. Ezt a kísérletek is bizonyítják (lásd csillaggal jelölt pontokat a 6*a* ábrán).

A közlemény alapjául szolgáló kutatást a szerző hollandiai tanulmányútja alatt az Eindhoveni Műszaki Egyetemen végezte. Munkájában nagy segítségére volt prof. H. Groendijk és dr. M. M. Abu-Zeid sok hasznos tanácsával és H. Moerman technikai segítségével.

IRODALOM

1. *Fowler, E. P.:* Effect of operating conditions on reverse gate current of junction FETs. Electronics Letters 1968, *4*, p. 216—217.
2. *Ryan, R. D.:* The gate currents of junction field effect transistors at low temperatures, Proc. IEEE 1969, *57*, p. 1225—26.
3. *Nakahara, M. & al.:* Anomalous enhancement of substrate terminal current in n-channel MOST, Proc. IEEE 1968, *56*, p. 2088—90.
4. *Ryan, R. D.:* Substrate current in silicon p-channel MOS transistors, Proc. IEEE 1969, *57*, p. 1424—25.
5. *Grebene, A. B.—Gandhi, S. K.:* Pinched mode operation of field effect transistors, Proc. IEEE 1969, *57*, p. 230—231.
6. *Ambrózy, A.:* Current source with infinite internal resistance, Electronics Letters, 1967, *3*, p. 68—69.
7. *Dacey, G. C.—Ross, I. M.:* The field-effect transistor, BSTJ 1955, *34*, p. 1158.
8. *Gunn, J. B.:* High electric field effects in semiconductors Progress in Semiconductors, Vol. 2. p. 213—247.

Tartalmi összefoglalások

ETO 65.012.2:681.3.06

Kovács Zs.-né—Kovács Zs.:

Optimalizálási eljárások

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) sz. 11.

A számítógéppel történő tervezéshez többváltozós függvény szélsőértékét kereső eljárások szükségesek. Ezekről ad megközelítően teljes áttekintést a dolgozat. Az ismertetett eljárások azonnal programozhatók. A szerzők a befejező szakaszban összegezik a különböző algoritmusokkal — GIER számítógépen — végzett kísérleteik eredményeit.

ETO 621.377.622.322.5

Dr. Katona J.:

Vékony mágneses rétegekkel működő memóriák kutatása

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) 11. sz.

A szerző közleményében beszámol a párologtatás útján előállított sík memóriák és az elektrolitosan készített huzal memóriák előállítása tárgyában a Híradástechnikai Ipari Kutató Intézetben folyó kutatásokról. Ismerteti a kidolgozott eljárásokat az előállításhoz alkalmazott berendezéseket, az előállított memóriák vizsgálatát s a vizsgálatok eredményeit. Táblázatokban foglalja össze az előállított memóriák paramétereit.

ETO 621.382.001.4: 621. 34.3: 669.782

Barta E.:

Diffundáltatott Si minták infravörös sugárzással történő vizsgálatáról

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) sz. 11.

A cikk kísérletet ismertet arra, hogy ABE és NISHI által javasolt módszerrel roncsolásmentesen határozzák meg planár technológiával előállított Si réteg felületi szabad töltéshordozó-sűrűségét és a diffuzió mélységét. A kísérletek azt mutatták, hogy a fent idézett módszer csak akkor használható, ha a bevitt szennyező eloszlási függvénye csak kevéssé tér el az ideális erfc- ill. Gauss eloszlástól. A szerző javaslatot tesz olyan optikai mérés elvégzésére, amelynek eredményeképp, az eloszlási függvénytől függetlenül, vékony felületi rétegben levő szabad töltéshordozók sűrűsége roncsolásmentesen meghatározható.

ETO 621.382.323.014.145

Dr. Ambrózy A.:

Térvezérlésű tranzisztorok vezérlőelektróda árama

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) sz. 11.

n- és p-csatornás záróréteges térvezérlésű tranzisztorokat vizsgáltunk széles hőmérsékleti tartományban. A termikusan gerjesztett kisebbségi töltéshordozók árama mellett másik áramösszetevő is létezik, amely alacsony hőmérsékleten igen nagy lehet. A csatornatípustól függő különböző hőmérsékleti tényezőket találtunk. A megfigyelt jelenségek az ütközéses ionizáció mechanizmusának, illetve a térvezérlésű tranzisztor térerőeloszlásának jobb megértésére vezethetnek.

Обобщения

ДК 65.012.2:681.3.06

Ковачнэ и Ковач Ж.:

Методы оптималиэации

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. (1970) № 11.

Проектирование с помощью вычислительной машины требует применения методов розыска минимума функции нескольких переменных. В статье рассматриваются такие методы, несколько из них в виде, пригодном непосредственно для программирования. В заключительной части обобщаются экспериментальные результаты, полученные путем проведения программ на ЭВМ ГИЭР.

ДК 621.377.622.322.5

Д-р Катона Й.:

Исследование памятей работающих с тонкими магнитными слоями

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. (1970) № 11.

Автор дает отчет об исследованиях по изготовлении плоских и проводных памятей путем испарения в Исследовательском Институте Техники Связи. Изложены разработанные методы, оборудования примененные к изготовлению, испытание изготовленных памятей и результаты этих испытаний. Параметры изготовленных памятей составлены в таблицах.

ДК 621.382.001.4 : 621.384.3 : 669.782

Барта, Э.:

Об исследовании диффузионных пленок Si инфракрасным облучением

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. (1970) № 11.

Проводились опыты определения поверхностной концентрации свободных носителей тока и глубины диффузии на пленках кремния, полученных планарной технологией методом, предложенным Абе и Ниши [5]-без механического повреждения образцов. Результаты исследований показали, что этот метод применим только в тех случаях, если распределение введенных примесей мало отличается от идеального распределения Гаусса или типа erfc. Предлагается такой способ оптических измерений, с помощью которого можно определить, без механического повреждения, концентрацию свободных носителей тока в тонком приповерхностном слое, независимо от распределения примесей.

ДК 621.382.323.014.145

Д-р Амбрози А.:

Ток управляющего электрода полевых транзисторов

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. 1970) № 11.

Полевые транзисторы с каналом р- и птипа перехода были испытаны в широкой температурной области. Возле тока термического возбужданных неосновных носителей есть тоже другой составляющий тока, который может быть очень высок на низкой температуре. В зависимости от типа канала находились разные температурные коэффициенты. Наблюденные явления могут помогать лучшее понимание распределения напряженности поля полевого транзистора и механизм ионизации толчком.

Zusammenfassungen

DK 65.012.2:681.3.06

Frau und Herr Zs. Kovács:

Optimisierungsvorgänge

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr. 11.

Zum Entwurf mit Computer sind Verfahren notwendig, welche eine Minimalisierung einer Funktion mit mehreren Variablen bestreben. Diese Verfahren sind in dem Artikel annähernd vollständig erörtert. Die beschriebenen Verfahren sind sogleich programmierbar. In dem letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der Experimente, die mit verschiedenen Algorithmen der Computer GIER erreicht wurden, zusammengefasst.

DK 621.377.622.322.5

Dr. J. Katona:

Forschung von Speichern mit Dünnmagnetschichten

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) Nr. 11.

Im dem Artikel erörtert der Verfasser die Forschungen die in dem Forschungsinstitut für die Nachrichtentechnische Industrie bezüglich der Erzeugung der Flach- und Drahtspeicher im Gange sind. Die ausgearbeiteten Vorgänge, die zur Herstellung angewendete Einrichtungen, die Prüfung der hergestellten Speicher und dessen Ergebnisse werden erklärt. Die Parameter der hergestellten Speicher werden in Tabellen zusammengefasst.

DK 621.382.001.4: 621.384.3: 669.782

E. Barta:

Zu einer infraroten Untersuchungsmethode von diffundierten Si-Proben

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr. 11.

Im vorliegenden Artikel wird der Versuch unternommen, die freie Ladungsträgerkonzentration einer dünnen Oberflächenschicht und die Eindringtiefed der Diffusion an mit der Planartechnologie hergestellten Si- Proben zu bestimmen unter Anwendung der von ABE und NISHI (5) beschriebenen, die Probe nicht zerstörenden Methode. Die Versuche ergeben, dass diese Methode nur in dem Fall anwendbar ist, in dem sich die Verteilungsfunktion der diffundierten Verunreinigung nur wenig von der im Idealfall angenommenen Gauss- bzw. erfc- Verteilung abweicht. Es wird eine optische Messung vorgeschlagen, derzufolge die freie Ladungsträgerkonzentration einer dünnen Oberflächenschicht, ohne Einfluss der Verteilungsfunktion, zerstörungsfrei bestimmt werden kann.

DK 621.382.323.014.145

Dr. A. Ambrózy:

Gate-Stram der Feldeffekt-Transistoren

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr. 11.

Es wurden Feldeffekt-Transistoren von n und p Kanälen in einem breiten Temperaturbereich geprüft. Neben dem Strom der thermisch erregten Minoritätsladungsträger gibt es auch eine andere Komponente, welche bei niedrigen Tenyseraturen sehr hoch sein kann. Es wurden verschiedene Temperaturkoeffizienten, die von dem Kanaltyp abhängen, gefunden. Die beobachteten Phänomene führen zu einem besseren Verständnis des Mechanismus der Stossionisation, oder zum Verständnis der Feldverteilung der Feldeffekt Transistoren.

Summaries

UDC 65.012.2:681.3.06

Mr. and Mrs. Zs. Kovács:

Optimizing Procedures

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 11.

The computer aided design needs procedures minimizing a function of several variables. These procedures are detailed in the article, some of them in an immediately programmable form. The authors summarize their experimental results obtained by running programmes on the computer GIER in the last section.

Résumés

CDU 65.012.2:681.3.06

Mme M. et Kovács, Zs:

Méthodes d'optimalisation

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N°. 11.

Pour le projet par un ordinateur, des méthodes pour chercher la valeur extrême des fonctions à plusieurs variables sont nécessaires. L'article donne un résumé approximativement complet de cettes méthodes. Les méthodes décrites peuven être programmées immés diatement. Les auteurs dans la partie finale donnent les resultat-avec les différents algorithmes sur un ordinateur GIER.

UDC 621.377.622.322.5

Dr. J. Katona:

Research of Memories with Thin Magnetic Films

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 11.

The author gives an account of the researches concerning the production of the plane memories and wire memories made by evaporation in the Industrial Research Institute for Telecommunication. The elaborated procedure and the equipments used for the production, the tests of the produced memories and the results obtained are presented. The parameters of the produced memories are illustrated in tables.

UDC 621.382.001.4: 621.384.3: 669.782

E. Barta:

Infrared Measurements on Diffused Si Samples

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 11.

This article deals with the application of the non-destructive method described by ABE and NISHI (5) to obtain the free charge carrier concentration and the junction depth on Si samples gained by planar technology. The experimental results indicate that the method is appliable only in case diffusion profiles do not differ greatly from the ideal erfc- and Gauss-profile, respectively. An optical investigation conuggested for the non-destructive determination of the free carrier is scentration of the surface layer without the disturbing influence of the distribution profile.

UDC 621.382.323.014.145

Dr. A. Ambrózy:

Gate Current of Field Effect Transistors

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 11.

n- and p-channel field effect transistors were tested in a wide temperature range. Besides the current of the ther mally excited minority charge carriers there is also another compo nent, which may be very large at low temperatures. Depending on the type of the channel different temperature coefficients were found. The observed phenomena may lead to the better understanding of the impact ionisation mechanism and to the field distribution of field effect transistors.

CDU 621.377.622.322.5

Dr. Katona, J.:

Recherche des mémoires à couche minces magnétiques

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 11.

L'auteur rend compte des recherches dans l'Institut de recherche industrielle de télécommunication concernant la production par évaporation de mémoires plans et de fil. Il expose les méthodes développées, l'appareillage utilisé pour la production, les essais des mémoires produits et leur résultats. Le paramètres de mémoires poduits sont groupés dans tableaux.

CDU 621.382.001.4: 621.384.3: 669.782

E. Barta:

Mesures des échantillons de Si dans l'infrarouge

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 11.

Nous avons repris une méthode non-destructive proposée par ABE et NISHI (5) dans le but de déterminer la densité des porteurs libres à la surface et la profondeur de la diffusion pour des échantillons de Si formés par technologie planaire. Nous avons démonstré, que la méthode antérieure ne peut être appliquée que dans le cas ou la distribution des porteurs de charge introduits ne diffère pas esentiellement d'une distribution idéale erfc ou Gauss. On expose une méthode de mesure optique, non- destructive permettant de déterminer la densité des porteurs libres dans une couche mince superficielle, pour des distributions différentes des cas idéals.

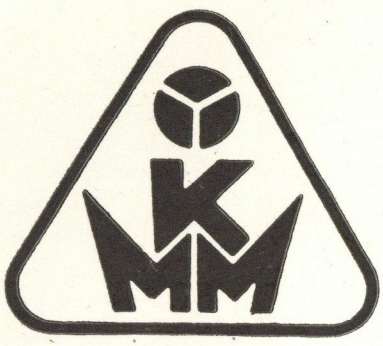
CDU 621.82.323.014.145

Dr. Ambrózy, A.:

Courant de l'électrode de commande des transistors à effet de champ

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 11.

Des transistors à jonction à effet de champ avec canaux n et p ont été essayés dans un domaine large des températures. A coté du courant des porteurs minoritaires à exitation thermique, il y a une composante de courant qui peut être très haute aux températures basses. Des coefficients de température differents ont été trouvés dépendant du type de canal. Les phénomènes obsevés peuvent conduire à une meilleure compréhension de la distribution de champ des transistors à effet de champ.



MAGYAR KÁBEL MŰVEK

VEZÉRIGAZGATÓSÁGA

Budapest, XI., Budafoki út 60 • Telefon: 453-590

GYÁRTMÁNYOK:

Jelző-, mérő-, működtetőkábelek

Erősáramú szigetelt vezetékek

Erősáramú kábelek 1–35 kV-ig

Alumínium és acél-alumínium szabadvezetékek

Tekercselőhuzalok

Switch-kábelek

Gumitömlő vezetékek

Híradástechnikai vezetékek

Távkábelek

Hírközlő kábelek

Hajókábelek

Zománchuzalok

Zárt-acélkötelek

1970 DEC - 4