E 870

HÍRADÁS-TECHNIKA

A HÍRADÁS-TECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET LAPJA

2

XXI. ÉVFOLYAM, 2. SZÁM, 33–64 OLDAL, BUDAPEST, 1970. FEBRUÁR HÓ

1970. február, XXI. évfolyam, 2. szám

HÍRADÁSTECHNIKA

A HÍRADÁSTECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET LAPJA

TARTALOM

DR. JACHIMOVITS LÁSZLÓ: Lépcsős transzformátorok mátrixanalízise ... 33
Epitaxiális félvezető rétegek szeminárium ... 39
DR. HAHN EMIL—KÓSZA GÉZA—ACZÉL JUDIT: Többszörös epitaxiális rétegek szennyezéseloszlása 41
SZÉKELY TAMÁSNÉ—VARGA LÁSZLÓ—TORNAY IMRE: Szilicium homoepitaxiális növesztése közben keletkező kristályhibák vizsgálata ... 48
GOSZTONY GÉZA: Többszörösen bekötött kimeneteket tartalmazó csatolóutas rendszerek méretezése 52
S. TÓTH FERENC: Sztereofónia ... 57
IV. Mikrohullámú Összeköttetések Kollokvium ... 61
Svéd Műszaki Hét ... 61
Tartalmi összefoglalások ... 62
Обобщения ... 62
Zusammenfassungen ... 62
Résumés ... 63
Summaires ... 63
Helyreigazítás ... 64

Szerkesztőség: BOGLÁR GYULA főszerkesztő, SZÖLLŐSI GYÖRGYNÉ szerkesztőségi titkár, BALOGH PÁL, DR. SÁRKÖZY GÉZA kandidátus és MAY PÉTER tudományos szerkesztők, DR. FLESCH ISTVÁN, DR. RUPPENTHAL PÉTER szerkesztőségi munkatársak. — A szerkesztőség címe: Budapest, V., Szabadság tér 5—6. III. em. 320. Telefon: 183-772 — A Híradástechnikai Tudományos Egyesület címe: Budapest, V., Szabadság tér 17. Telefon: 113-027

Szerkesztő bizottság tagjai: ALMÁSSY GYÖRGY kandidátus, BARTA ISTVÁN akadémikus, BATTISTIG GYÖRGY, BÍRÓ FERENC, BUDAI LAJOS, CZEGLÉDY GYÖRGY, ERDÉLYI JÁNOS kandidátus, GERGELY ÖDÖN, 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

INDEX: 25.375

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, közületi 61,066 vagy átutalás MNB 8. sz. folyószámlájára. A folyóirat külföldre előfizethető: „KULTURA" P. O. B. 149 Budapest, 62.

69.3702 Egyetemi Nyomda, Budapest. Felelős vezető: JANKA GYULA igazgató

HÍRADÁSTECHNIKA

A HÍRADÁSTECHNIKAI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET LAPJA

DR. JACHIMOVITS LÁSZLÓ
BME Mikrohullámú Híradástechnikai Tanszék

Lépcsős transzformátorok mátrixanalízise

ETO 512.831: 621.372.512

A különböző méretű és hullámellenállású tápvonalak illesztéséhez alkalmazott n-lépcsős átmenetek analízisének és szintézisének közelítő módszerei a szakirodalomból ismeretesek [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. A közelítés abban áll, hogy az átmenetek bemeneti feszültségi reflexiótényezőjének felírásánál elhanyagolják az ugráskapacitások, a többszörös reflexiók és a lépcsők reflexiós csillapításának hatását. Arra a kérdésre, hogy a fenti elhanyagolások mikor megengedettek és mikor nem, a szakirodalom nem ad konkrét választ. Kivételt képez az ugráskapacitások fázistoló hatásának konpenzációjára való utalás [2].

A lépcsős transzformátorok szórási mátrixanalízise lehetővé teszi a fentiekben említett elhanyagolások hatásának egyidejű vizsgálatát. Ennek során megállapítható, hogy

a) A reflexiós csillapítások és a többszörös reflexiók gyakorlatilag kölcsönösen kompenzálják egymás hatását.

b) Az ugráskapacitások fázistoló hatása kompenzálható a lépcsők közötti tápvonalszakaszok hosszának megfelelő megválasztásával.

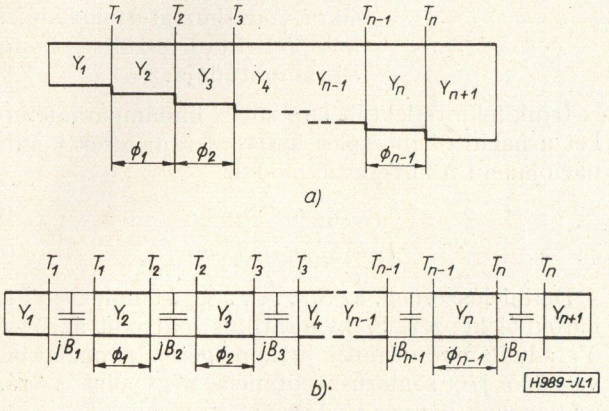
c) Az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatása az egyes tápvonalszakaszok hullámadmittanciájának megfelelő megválasztásával kompenzálható.

A következőkben először meghatározzuk egy egylépcsős átmenet szórási mátrixának elemeit, majd egy n-lépcsős átmenet bemeneti feszültségi reflexiótényezőjét. Célunk, az ugráskapacitások, a többszörös reflexiók és a reflexiós csillapítások hatásának leírása, s ezen hatások kompenzációs lehetőségének feltárása.

Befejezésül összefoglaljuk a lépcsős transzformátorok tervezésének menetét és az elmondottak illusztrálására két számpéldát közlünk.

Az egylépcsős átmenet szórási mátrixának elemei

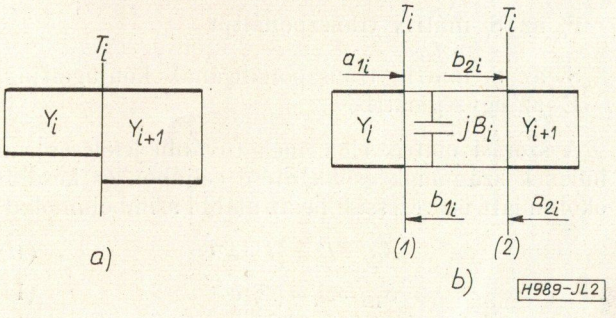
Az $Y_1, Y_2, \ldots, Y_{n+1}$ hullámadmittanciájú, $\varnothing_1, \varnothing_2, \ldots, \varnothing_n$ elektromos hosszúságú homogén tápvonalakból felépített n-lépcsős átmenetet az 1*a* ábrán tüntettük fel. Vizsgálatainkat arra a leggyakoribb esetre korlátozzuk, amikor a lépcsős átmeneteknél fellépő mezőtorzulás hatása egy söntkapacitás hatásával ekvivalens. Feltételezzük továbbá, hogy az



1. ábra

elektromágneses hullám terjedése a távvezetékeken csak az alapmódban lehetséges. E feltételek teljesülése esetén az n-lépcsős átmenet ekvivalense az 1*b* ábra szerinti, ahol B_i a C_i ugráskapacitás szuszceptanciája: $B_i = \omega C_i$; $i = 1, 2, \ldots, n$.

A lépcsős transzformátorok műszaki jellemzője az Y_1 hullámadmittanciájú tápvonalon, a T_1 jelű referencia síkra vonatkoztatott Γ feszültségi reflexió-



2. ábra

Beérkezett: 1969. IX. 24.

tényező, az Y_{n+1} hullámadmittanciájú tápvonal illesztett lezárása esetén. Γ meghatározásához ismerni kell az ugráskapacitás négypólusok szórási mátrixát. Emeljünk ki tehát az átmenetből egy tetszés szerinti T_i síkú lépcsős átmenetet — 2*a* ábra —, tüntessük fel ekvivalens négypólusát — 2*b* ábra — és határozzuk meg az ekvivalens négypólus $\mathbf{S}_i$ szórási mátrixát.

A 2*b* ábrán feltüntettük az ekvivalens négypólus elektromos állapotát leíró a_{1i}, a_{2i} haladó — és b_{1i}, b_{2i} reflektált kapocspári hullámparamétereket is. Definíciószerűen [14]:

$$a_{1i}=U_{h1r}\sqrt{Y_i} \tag{1}$$

$$a_{2i}=U_{r2i}\sqrt{Y_{i+1}} \tag{2}$$

$$b_{1i}=U_{r1i}\sqrt{Y_i} \tag{3}$$

$$b_{2i}=U_{h2i}\sqrt{Y_{i+1}} \tag{4}$$

ahol:

U_{h1i}, illetve U_{r1i} az Y_i hullámadmittanciájú tápvonalon, a T_i jelű referencia síkra vonatkoztatott haladó, illetve reflektált feszültség komplex amplitúdója.

U_{h2i}, illetve U_{r2i} az Y_{i+1} hullámadmittanciájú tápvonalon, a T_i jelű referencia síkra vonatkoztatott haladó, illetve reflektált feszültség komplex amplitúdója.

Írjuk fel a reflektált kapcsolási hullámparamétereket a haladó kapocspári hullámparaméterek kombinációjaként a következő módon:

$$b_{1i}=S_{11i}a_{1i}+S_{12i}a_{2i} \tag{5}$$

$$b_{2i}=S_{21i}a_{1i}+S_{22i}a_{2i} \tag{6}$$

Definíciószerűen, az $S_{11i}, \ldots, S_{22i}$ komplex együtthatókból képzett $\mathbf{S}_i$ kvadratikus mátrixot az Y_i és Y_{i+1} hullámadmittanciájú homogén tápvonalakban végződő jB_i söntszuszveptancia négypólus szórási mátrixának nevezzük. Tehát:

$$\mathbf{S}_i=\begin{bmatrix} S_{11i} & S_{12i} \\ S_{21i} & S_{22i} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Mivel a vizsgált jB_i söntszuszceptancia négypólus reciprok, és reaktáns, $\mathbf{S}_i$ szórási mátrixa szimmetrikus és uniter [14]. Írható tehát, hogy

$$S_{21i}=S_{12i} \tag{8}$$

és

$$\overset{*}{\tilde{\mathbf{S}}}_i\mathbf{S}_i=\mathbf{E} \tag{9}$$

ahol

$\tilde{\mathbf{S}}_i$ az $\mathbf{S}_i$ mátrix transzponáltja

$\overset{*}{\tilde{\mathbf{S}}}_i$ az $\mathbf{S}_i$ mátrix transzponáltjának konjugáltja

$\mathbf{E}$ az egységmátrix

A szórási mátrix elemeinek további jelölésére, az indexek számának csökkentése céljából, és későbbi okok miatt is, vezessük be az alábbi szimbólumokat:

$$S_{11i}=\Gamma_i=|\Gamma_i|e^{j\gamma_i} \tag{10}$$

$$S_{12i}=\Delta_i=|\Delta_i|e^{j\delta_i} \tag{11}$$

$$S_{22i}=\Theta_i=|\Theta_i|e^{j\vartheta_i} \tag{12}$$

A (9) mátrixegyenletből felírható lineáris egyenletrendszer megoldásaként, a szórási mátrix elemeire az alábbi kötések adódnak [14]:

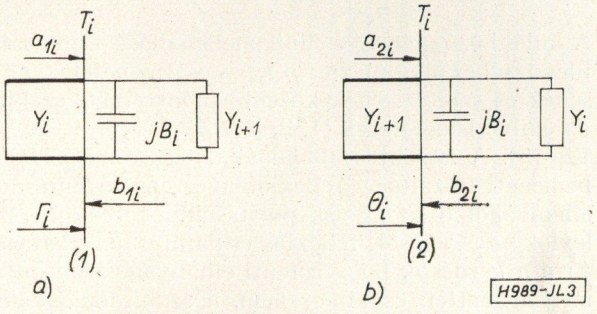
$$|\Theta_i|=|\Gamma_i| \tag{13}$$

$$|\Delta_i|=\sqrt{1-|\Gamma_i|^2} \tag{14}$$

$$\delta_i=\pm\frac{\pi}{2}+\frac{\gamma_i+\vartheta_i}{2} \tag{15}$$

A (14) és (15) egyenletek alapján Γ_i és Θ_i ismeretében Δ_i meghatározható.

Az (5) és (6) egyenletekből közvetlenül kiolvasható Γ_i és Θ_i fizikai jelentése. Γ_i az (1) jelű referencia síkra vonatkoztatott feszültségi reflexiótényező a (2) jelű referencia sík illesztett lezárása ($a_{2i}=0$) esetén; Θ_i pedig a (2) jelű referencia síkra vonatkoztatott feszültségi reflexiótényező az (1) jelű végződés illesztett lezárása ($a_{1i}=0$) esetén. Ezért Γ_i a 3*a* ábra, Θ_i pedig a 3*b* ábra szerinti kétpólus feszültségi reflexiótényezője. A tápvonalelmélet alapján [12]:



3. ábra

$$\Gamma_i=\frac{Y_i-(Y_{i+1}+jB_i)}{Y_i+(Y_{i+1}+jB_i)} \tag{16}$$

$$\Theta_i=\frac{Y_{i+1}-(Y_i+jB_i)}{Y_{i+1}+(Y_i+jB_i)} \tag{17}$$

Bevezetve az alábbi jelöléseket:

$$Y'_i=\frac{Y_i}{Y_{i+1}} \tag{18}$$

$$B'_i=\frac{B_i}{Y_{i+1}} \tag{19}$$

$$\Gamma_{i0}=\frac{Y'_i-1}{Y'_i+1} \tag{20}$$

$$m_i=\sqrt{\frac{1+\left(\frac{B'_i}{Y'_i-1}\right)^2}{1+\left(\frac{B'_i}{Y'_i+1}\right)^2}} \tag{21}$$

$$\alpha_i=\operatorname{arc\,tg}\frac{B'_i}{Y'_i-1} \tag{22}$$

$$\beta_i=\operatorname{arc\,tg}\frac{B'_i}{Y'_i+1} \tag{23}$$

Γ_i és Θ_i mátrixelemek a következő formában írhatók fel:

$$\Gamma_i = m_i \Gamma_{i0} e^{-j(\alpha_i+\beta_i)} \tag{24}$$

$$\Theta_i = m_i \Gamma_{i0} e^{j(\pm\pi+\alpha_i-\beta_i)} \tag{25}$$

A (14), (15), (24) és (25) egyenletek alapján a Δ_i mátrixelemre a következő összefüggés adódik:

$$\Delta_i = \sqrt{1-(m_i \Gamma_{i0})^2}\, e^{j(\pm\pi-\beta_i)} \tag{26}$$

Ezzel meghatároztuk az egylépcsős átmenet szórási mátrixának elemeit az Y_i, Y_{i+1} és jB_i kapcsolási paraméterek függvényében. Megállapítható, hogy a C_i ugráskapacitás a szórási mátrix elemeinek amplitúdóját is és fázisát is módosítja. Az amplitúdómódosító hatást az m_i együttható, a fázistolást az α_i és β_i szögek írják le.

Az ugráskapacitás hatásának elhanyagolása esetén $m_i=1$; α_i, $\beta_i=0$, s így a T_i síkú lépcsős átmenet szórási mátrixának elemei:

$$\Gamma_i = \Gamma_{i0}; \quad \Delta_i = -\sqrt{1-\Gamma_{i0}^2} \quad \text{és} \quad \Theta_i = -\Gamma_{i0} \tag{27}$$

Az n-lépcsős átmenet
Γ bemeneti feszültségi reflexiótényezője

A lépcsős transzformátor bemeneti feszültségi reflexiótényezőjének meghatározásához kapcsoljunk az átmenet bemenetéhez generátort, kimenetéhez pedig illesztett lezárót. Az ekvivalens áramkör jB_i kapcsolási paramétereit helyettesítsük az S_i szórási mátrixával adott négypólusokkal (4. ábra).

Definíciószerűen a lépcsős transzformátor bemeneti feszültségi reflexiótényezője:

$$\Gamma = \left.\frac{b_{11}}{a_{11}}\right|_{a_{2n}=0} \tag{28}$$

A továbbiakban vegyük figyelembe, hogy ha valamely T_{i+1} síkú lépcsős átmenet bemenetére vonatkoztatott feszültségi reflexiótényezőt Γ'_{i+1}-vel jelölünk;

$$\Gamma'_{i+1} = \left.\frac{b_1 1(i+1)}{a_1 1(i+1)}\right|_{a_{2n}=0}, \tag{29}$$

akkor a tápvonalelmélet alapján írható, hogy a T_{i+1} jelű síktól a generátor felé eső Φ_i elektromos hosszúságú távvezeték bemenetére vonatkoztatott feszültségi reflexiótényező, a veszteségek elhanyagolása esetén:

$$\frac{a_{2i}}{b_{2i}} = \Gamma'_{i+1} e^{-j2\Phi_i} \tag{30}$$

Így az (5), (6) és (30) egyenletek megoldásaként a T_i síkú lépcsős átmenet bemenetére vonatkoztatott Γ'_i feszültségi reflexiótényező felírható Φ_i, Γ'_{i+1} és az S_i szórási mátrix elemeinek függvényében. A megoldás:

$$\Gamma'_i = \frac{b_{1i}}{a_{1i}} = \Gamma_i + \frac{\Delta_i^2}{1-\Theta_i \Gamma'_{i+1} e^{-j2\Phi_i}} \Gamma'_{i+1} e^{-j2\Phi_i} \tag{31}$$

A (31) egyenlet alapján a transzformátor bemeneti reflexiótényezője:

$$\Gamma = \Gamma'_1 = \Gamma_1 + \frac{\Delta_1^2}{1-\Theta_1 \Gamma'_2 e^{-j2\Phi_1}} \Gamma'^{-j2\Phi_1}_2 \tag{32}$$

ahol

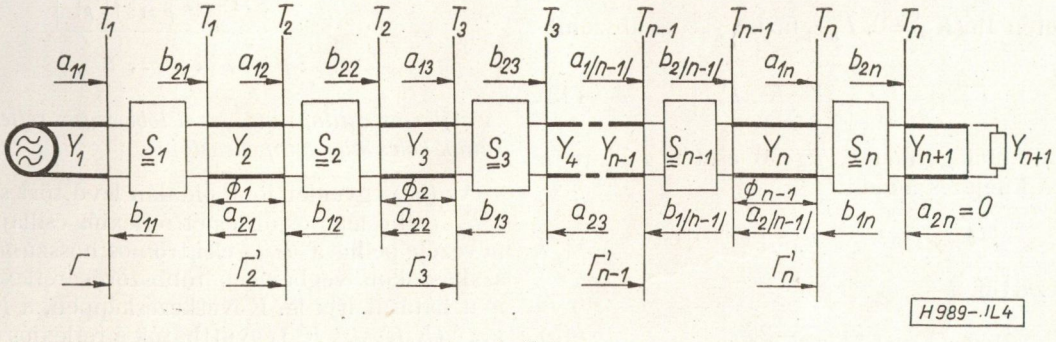
$$\Gamma'_2 = \Gamma_2 + \frac{\Delta_2^2}{1-\Theta_2 \Gamma'_3 e^{-j2\Phi_2}} \Gamma'_3 e^{-j2\Phi_2} \tag{33}$$

$$\Gamma'_3 = \Gamma_3 + \frac{\Delta_3^2}{1-\Theta_3 \Gamma'_4 e^{-j2\Phi_3}} \Gamma'_4 e^{-j2\Phi_3} \tag{34}$$

.
.
.

$$\Gamma'_{n-1} = \Gamma_{n-1} + \frac{\Delta_{n-1}^2}{1-\Theta_{n-1} \Gamma_n e^{-j2\Phi_{n-1}}} \Gamma_n e^{-j2\Phi_{n-1}} \tag{35}$$

A (32), (33), (34), (35) egyenletekből közvetlenül kiolvasható, hogy Γ meghatározott, ha ismert Γ'_2; Γ'_2 meghatározott, ha ismert Γ'_3; és így tovább. Mindebből az következik, hogy $\Gamma'_n = \Gamma_n$ ismeretében először Γ'_{n-1} —, majd Γ'_{n-1} ismeretében Γ'_{n-2} —, és így tovább, meghatározása adja a feladat megoldásának menetét. Mindamellett a fenti formulák a konkrét számításokhoz nem alkalmasak. Ezért célszerűen először kompenzáljuk az ugráskapacitások fázistoló hatását, s csak ezt követően írjuk fel a bemeneti reflexiótényezőt, $f=f_0$ sávközépi frekvencián, a számításhoz alkalmas $\Gamma = |\Gamma| \exp(j\gamma)$ formában.



4. ábra

Az ugráskapacitások fázistoló hatásának kompenzálása

Az ugráskapacitások fázistoló hatásának elhanyagolása mellett méretezett különböző karakterisztikájú lépcsős átmenetek Φ paramétereit úgy választják meg, hogy $f=f_0$ sávközépi frekvencián bármely két szomszédos lépcsőnél reflektálódó hullámok ellentétes fázisban találkozzanak. Így a Φ paraméterekre adódó megoldás sávközépen: $\Phi_1=\Phi_2=\ldots=\Phi_{n-1}=\pi/2$.

Figyelembe véve az ugráskapacitások fázistoló hatását is, megállapítható, hogy a szomszédos lépcsőknél reflektálódó hullámok $\pm\pi$-től eltérő fáziskülönbséggel találkoznak, s így a bemeneti reflexiótényező tényleges értéke eltér a számítottól.

Keresve az ugráskapacitások fázistoló hatásának kompenzációs lehetőségét, induljunk ki a (35) egyenletből. Alkalmazva a (10), (11) és (12) egyenletekkel megadott jelöléseket, figyelembe véve a (13), (14) és (15) egyenletek szerinti összefüggéseket, továbbá bevezetve a

$$\varphi_n=\gamma_n+\vartheta_{n-1}-2\Phi_{n-1} \tag{36}$$

és

$$K_n=\frac{1-|\Gamma_{n-1}|^2}{1-|\Gamma_{n-1}|\,|\Gamma_n|e^{j\varphi_n}} \tag{37}$$

jelöléseket, Γ'_{n-1} a következő formában írható fel:

$$\Gamma'_{n-1}=[|\Gamma_{n-1}|-K_n|\Gamma_n|e^{j\varphi_n}]e^{j\gamma_{n-1}} \tag{38}$$

A (37) és (38) egyenletek alapján a T_n és a szomszédos T_{n-1} síkú lépcsős átmeneteknél reflektálódó hullámok $\varphi_n=0$ esetén találkoznak ellentétes fázisban. A (36) egyenletből adódóan $\varphi_n=0$ feltétel teljesül, ha

$$\Phi_{n-1}=\frac{\gamma+\vartheta_{n-1}}{2} \tag{39}$$

áll. Mivel a (24) és (25) egyenletek alapján:

$$\gamma_n=-(\alpha_n+\beta_n) \tag{40}$$

és

$$\vartheta_{n-1}=\pi+(\alpha_{n-1}-\beta_{n-1}) \tag{41}$$

a (39) feltételi egyenlet a következő formában is felírható:

$$\boxed{\Phi_{n-1}=\frac{\pi}{2}-\frac{1}{2}[(\alpha_n+\beta_n)-(\alpha_{n-1}-\beta_{n-1})]} \tag{42}$$

$\varphi_n=0$ esetén $\mathrm{Im}(K_n)=0$, Γ'_{n-1} fázisa γ_{n-1} és abszolútértéke:

$$|\Gamma'_{n-1}|=\big||\Gamma_{n-1}|-K_n|\Gamma_n|\big| \tag{43}$$

A fentivel analóg módon, $\varphi_n=0$ esetén Γ'_{n-2}-re a következő kifejezés adódik:

$$\Gamma'_{n-2}=[|\Gamma_{n-2}|-K_{n-1}|\Gamma'_{n-1}|\,e^{j\varphi_{n-1}}]\,e^{j\gamma_{n-2}} \tag{44}$$

ahol bevezettük a

$$\varphi_{n-1}=\gamma_{n-1}+\vartheta_{n-2}-2\Phi_{n-2} \tag{45}$$

és

$$K_{n-1}=\frac{1-|\Gamma_{n-2}|^2}{1-|\Gamma_{n-2}|\,|\Gamma'_{n-1}|\,e^{j\varphi_{n-1}}} \tag{46}$$

jelöléseket.

A (44) és (46) egyenletek alapján a T_{n-1} és a szomszédos T_{n-2} síkú lépcsős átmeneteknél reflektálódó hullámok $\varphi_{n-1}=0$ esetén találkoznak ellentétes fázisban. A (45) egyenlet alapján $\varphi_{n-1}=0$, ha

$$\Phi_{n-2}=\frac{\gamma_{n-1}+\vartheta_{n-2}}{2} \tag{47}$$

illetve, ha

$$\boxed{\Phi_{n-2}=\frac{\pi}{2}-\frac{1}{2}[(\alpha_{n-1}+\beta_{n-1})-(\alpha_{n-2}-\beta_{n-2})]} \tag{48}$$

áll. $\varphi_{n-1}=0$ esetén $\mathrm{Im}(K_{n-1})=0$, Γ'_{n-2} fázisszöge γ_{n-2} és abszolútértéke:

$$|\Gamma_{n-2}|=\big||\Gamma_{n-2}|-K_{n-1}|\Gamma_{n-1}|+K_{n-1}K_n|\Gamma_n|\big| \tag{49}$$

Továbbfolytatva a fenti műveleteket, végeredményben arra a megállapításra jutunk, hogy bármely két szomszédos lépcsőnél reflektálódó hullám ellentétes fázisban találkozik, ha

$$\boxed{\Phi_k=\frac{\pi}{2}-\frac{1}{2}[(\alpha_{k+1}+\beta_{k+1})-(\alpha_k-\beta_k)]} \tag{50}$$

áll, ahol $k=1, 2, 3, \ldots, (n-1)$.

Az (50) feltételi egyenlet alapján az ugráskapacitások fázistoló hatása kompenzált, ha az Y_{k+1} hullámadmittanciájú tápvonalszakasz elektromos hosszát $\pi/2$-ről

$$\boxed{\Delta\Phi_k=\frac{1}{2}[\alpha_{k+1}+\beta_{k+1})-(\alpha_k-\beta_k)]} \tag{51}$$

elektromos hosszal csökkentjük.

A kompenzált lépcsős átmenet bemeneti feszültségi reflexiótényezőjének fázisszöge γ_1 és abszolútértéke:

$$\boxed{\begin{aligned}|\Gamma|=\big||\Gamma_1|-K_2|\Gamma_2|\big|+K_2K_3|\Gamma_3|-\ldots\pm\\ \pm(K_2K_3\ldots K_n)|\Gamma_n|\big|\end{aligned}} \tag{52}$$

ahol

$$\boxed{K_p=\frac{1-|\Gamma_{p-1}|^2}{1-|\Gamma_{p-1}|\,|\Gamma'_p|}} \tag{53}$$

$$p=2, 3, \ldots, n$$

A reflexiós csillapítások és a többszörös reflexiók hatásának kölcsönös kompenzációja

Az (53) egyenlet jobb oldalán levő tört számlálója a T_{p-1} síkú lépcsős átmenet reflexiós csillapításának, nevezője pedig a Φ_{p-1} elektromos hosszúságú vonalszakaszokon végbemenő többszörös reflexiós folyamat hatását írja le. Következésképpen, a K_2; K_2K_3; $\ldots$; $(K_2K_3\ldots K_n)$ együtthatók a reflexiós csillapítá-

sok és a többszörös reflexiók együttes hatását írják le. Mivel általában írható, hogy

$$|\Gamma_{p-1}|^2 \ll 1 \quad \text{és} \quad |\Gamma_{p-1}|\,|\Gamma'_p| \ll 1,$$

gyakorlatilag $K_p=1$-nek vehető. Fizikailag ez azt jelenti, hogy a többszörös reflexiók és a reflexiós csillapítások kölcsönösen kompenzálják egymás hatását. A kompenzáció mértéke a lépcsők számától függően változik, elvileg nem 100%-os, de gyakorlatilag annak vehető. E felismerés lehetővé teszi a bemeneti reflexiótényező felírását a (32) egyenletnél lényegesen egyszerűbb formában. Ugyanis, ha az átmenetet első közelítésben $\Phi_0=\pi/2$ azonos hosszúságú távvezetékszakaszokból építjük fel, és figyelembe vesszük, hogy $f \neq f_0$ frekvencián is $K_p=1$-nek vehető, akkor a (32) egyenletből Γ-ra a következő kifejezést kapjuk:

$$\Gamma=|\Gamma_1|e^{j\gamma_1}+|\Gamma_2|e^{j\varphi'_2}+|\Gamma_3|\,e^{j\varphi'_3}+\ldots+|\Gamma_n|\,e^{j\varphi'_n} \quad (54)$$

ahol

$$\varphi'_p=\gamma_p-2(p-1)\Phi+2\sum_{l=1}^{p-1}\delta_l=$$

$$=-\left(\alpha_p+\sum_{l=1}^{p}\beta_l\right)-2(p-1)\Phi \quad (55)$$

Az (54) egyenletből $f=f_0$ sávközépi frekvencián, $\Phi=\Phi_0=\pi/2$ helyettesítéssel Γ-ra a következő megoldást kapjuk:

$$\Gamma=|\Gamma_1|\,e^{j\gamma_1}-|\Gamma_2|\,e^{j\Delta\varphi'_2}+|\Gamma_3|\,e^{j\Delta\varphi'_3}-\ldots\pm|\Gamma_n|\,e^{j\Delta\varphi'_n} \quad (56)$$

ahol

$$\Delta\varphi'_p=-\left(\alpha_p+\sum_{l=1}^{p}\beta_l\right) \quad (57)$$

Az (56) és (57) egyenletek alapján az ugráskapacitások fázistoló hatásának kompenzációjához a fentiektől eltérő módszer is alkalmazható. Ugyanis az ugráskapacitások fázistoló hatása kompenzált, ha $\gamma=0$ és $\Delta\varphi'_p=0$ áll. Ez elérhető oly módon, hogy a T_1 jelű lépcsős átmenet $-\gamma/2$, a T_2 síkú lépcsős átmenet $-\Delta\varphi_2/2$, és így tovább, végül a T_n síkú lépcsős átmenetet $-\Delta\varphi'_n/2$ elektromos hosszal közelebb vesszük fel a generátorhoz [2].

Az ugráskapacitások amplitúdó-módosító hatásának kompenzálása

A (21) egyenlettel bevezetett m_i tényezők az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatását írják el. Hatásuk az Y_k hullámadmittanciák értékének megfelelő megválasztásával kompenzálható.

Pl. $n=2$ és $\varphi_2=0$ esetén $|\Gamma|$ a következő formában írható fel:

$$|\Gamma|=\big||\Gamma_1|-K_2|\Gamma_2|\big|=\left|\frac{m_1\Gamma_{10}-m_2\Gamma_{20}}{1-m_1m_2\Gamma_{10}\Gamma_{20}}\right| \quad (58)$$

Így $n=2$ esetén Y_2 értéke akkor optimális, ha

$$\boxed{m_1\Gamma_{10}=m_2\Gamma_{20}} \quad (59)$$

fennáll. Az (59) feltételi egyenletből Y_2 optimális értéke direkt úton nem határozható meg. Ezért a tervezetnél első közelítésben elhanyagoljuk az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatását ($m_i=1$) és a

$$\Gamma_{10}=\Gamma_{20} \quad (60)$$

feltételi egyenletből indulunk ki. A megoldás, mint ismeretes [12]:

$$Y_2=\sqrt{Y_1Y_3} \quad (61)$$

Az adott átmenet ugráskapacitásainak ismeretében m_1 és m_2 értéke a (21) egyenletből meghatározható. A számítások eredményeként $m_2>m_1$ adódik. Így az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatása Y_2 csökkentésével kompenzálható, Y_2 csökkentésével ugyanis Γ_{10} nő és Γ_{20} csökken.

$n>2$ esetén az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatása gyakorlatilag elhanyagolható mértékű.

A lépcsős transzformátorok tervezésének menete

A lépcsős transzformátorok bemeneti reflexiótényezőjét leíró (32) egyenletből kiindulva, előírt tulajdonságú lépcsős transzformátor tervezéséhez alkalmas, egyszerű matematikai formulák nem vezethetők le. Mindamellett az a felismerés, hogy az ugráskapacitások hatása utólag kompenzálható — tehát első közelítésben elhanyagolható —, továbbá, hogy a reflexiós csillapítások és a többszörös reflexiók gyakorlatilag kölcsönösen kompenzálják egymás hatását, lehetővé teszi a bemeneti reflexiótényezőnek első közelítésben egyszerűbb formában történő felírását. Az adott formulából kiindulva az előírt tulajdonságú lépcsős átmenetek geometriai méretei első közelítésben már meghatározhatók, s ezek ismeretében és a fenti összefüggések birtokában a szükséges korrekciók elvégezhetők. Jelenlegi ismereteink alapján a lépcsős transzformátorok tervezése csak közelítő módon, több lépésben lehetséges.

Első közelítésben azonos hosszúságú tápvezetékszakaszokból felépült lépcsős átmenetekből indulunk ki és elhanyagoljuk az ugráskapacitások hatását. Kiindulva a $K_p=1$ esetén érvényes (54) egyenletből, $m_i=1$; α_i, $\beta_i=0$ helyettesítéssel a Γ feszültségi reflexiótényezőre a következő kifejezés adódik:

$$\Gamma=\Gamma_{10}+\Gamma_{20}\,e^{-j2\Phi}+\Gamma_{30}\,e^{-j4\Phi}+\ldots+\Gamma_{n0}\,e^{-j2(n-1)\Phi} \quad (62)$$

A (62) egyenlettel adott polinom különböző karakterisztikus függvényekkel történő egybevetése, a megoldás és így a különböző karakterisztikájú lépcsős transzformátorok első közelítésben történő tervezésének menete a szakirodalomból ismert. Ennek ismeretében a műszaki előírásokat kielégítő Y_k hullámadmittanciák és ezeken keresztül a lépcsős átmenet geometriai méretei meghatározottak.

A fentiekben méretezett és így ismert geometriájú lépcsős átmenet C_i ugráskapacitásai kézikönyvek alapján meghatározhatók. C_i és Y_i ismeretében a (21), (22) és (23) egyenletekből m_i α_i és β_i numerikus értéke kiszámítható. Meghatározzuk az (53) egyenlettel adott K_p értékét és ezek ismeretében az (52) egyenletből $|\Gamma|$ értékét. Amennyiben $|\Gamma|$ értéke a műszaki előírást nem elégíti ki, az Y_k hullámadmittanciák értékének megfelelő megválasztásával elvégezzük a szükséges kompenzációt.

A tervezés befejező lépéseként kompenzáljuk az ugráskapacitások fázistoló hatását. Kiszámítjuk az (51) egyenlettel adott $\Delta\Phi_k$ elektromos hosszakat, s ennek megfelelően a T_k és T_{k+1} jelű síkok közötti tápvonalszakasz hosszát $\pi/2-\Delta\Phi_k$ értékre állítjuk be.

Példák

Vizsgáljuk azokat az eseteket, amikor az $a_1\times b_1=58\times 7{,}25$ mm — és az $a_{n+1}\times b_{n+1}=58\times 29$ mm-es téglalap keresztmetszetű homogén csőtápvonalak illesztése:

1. kétlépcsős átmenettel,
2. háromlépcsős binomiális átmenettel történik.

Legyen az üzemi hullámhossz: $\lambda_0=8$ cm. Mivel, $a_1=a_2=\ldots=a_{n+1}=a=58$ mm, a tápvonalon mért λ_{g0} hullámhossz valamennyi vonalszakaszon megegyező és értéke [16]:

$$\lambda_{g0}=\frac{\lambda_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}=11 \text{ cm}$$

1. Kétlépcsős átmenet méretezése

A (61) egyenletből a hullámadmittanciák aránya:

$$\frac{Y_1}{Y_2}=\frac{Y_2}{Y_3}=\sqrt{\frac{Y_1}{Y_3}} \qquad (63)$$

Mivel $Y_i\sim 1/b_i$ [12], a (63) egyenletből: $Y_1'=Y_1/Y_2=2$; $Y_2'=Y_2/Y_3=2$ és így b_2-re első közelítésben: $b_2=14{,}5$ mm adódik.

$Y_1'=Y_2'=2$ helyettesítéssel a (20) egyenletből:

$$\Gamma_{10}=\Gamma_{20}=\frac{1}{3}$$

Az ugráskapacitások normalizált szuszceptanciája

A [15] kézikönyv alapján:

$$\frac{b_1}{b_3}=0{,}5 \quad \text{és} \quad \frac{2b_2}{\lambda_{g0}}=0{,}264 \quad \text{esetén} \quad \frac{B_1}{Y_2}\frac{\lambda_{g0}}{2b_2}\cong 0{,}8;$$

$$\frac{b_2}{b_3}=0{,}5 \quad \text{és} \quad \frac{2b_3}{\lambda_{g0}}=0{,}527 \quad \text{esetén} \quad \frac{B_2}{Y_3}\frac{\lambda_{g0}}{2b_3}\cong 0{,}92$$

A fenti adatok alapján az ugráskapacitások normalizált szuszceptanciája: $B_1'=0{,}211$ és $B_2'=0{,}485$.

Poláris admittancia diagram alkalmazásával könnyen megállapítható, hogy a kompenzálatlan átmenet r bemeneti állóhullámaránya [16]:

$$r=\frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}\cong 1{,}42$$

Az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatásának kompenzálása

A (21) egyenletből B_i' és Y_i' fenti értékei mellett: $m_1=1{,}02$ és $m_2=1{,}097$. Így az (37) egyenletből a többszörös reflexiók és a reflexiós csillapítás együttes hatását leíró K_2 paraméterre: $K_2=1{,}0097$ adódik. A transzformátor bemeneti feszültségi reflexiótényezőjének abszolútértéke $\varphi_2=0$ esetén, az (52) egyenlet alapján: $|\Gamma|=0{,}025$. Mivel

$$m_1\Gamma_{10}=0{,}34<m_2\Gamma_{20}=0{,}365$$

az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatása a b_2 méret növelésével kompenzálható.

Pl. $b_2=15$ mm esetén:

$\Gamma_{10}=0{,}3464$; $\Gamma_{20}=0{,}3181$; $m_1=1{,}022$ és $m_2=1{,}103$,

így

$$|\Gamma|\cong 0{,}003 \quad \text{és} \quad r\cong 1{,}006$$

Mivel

$$m_1\Gamma_{10}=0{,}354>m_2\Gamma_{20}=0{,}351,$$

$b_2=15$ mm esetén már túlkompenzáció áll elő. Ha az $m_i\Gamma_{i0}$ szorzat változását b_2-vel, a 14,5 mm $\leq b_2\leq$ 15mm intervallumba első közelítésben lineárisnak vesszük, akkor az $m_1\Gamma_{10}$ és az $m_2\Gamma_{20}$ egyenesek metszéspontja alapján $b_2=14{,}95$ mm adódik. A gyártási toleranciák figyelembevételével, $b_2=14{,}95$ mm névleges méret és $\varphi_2=0$ esetén várható, hogy $|\Gamma|\leq 0{,}003$, azaz $r\leq 1{,}006$.

Az ugráskapacitások fázistolóhatásának kompenzálása

$b_2=14{,}95$ mm esetén $Y_1'=2{,}06$, $Y_2'=1{,}933$, $B_1'=0{,}24$ és $B_2=0{,}464$. Így a (22) és (23) egyenletekből:

$$\alpha_1=12{,}5°; \quad \alpha_2=26{,}5°; \quad \beta_1=5{,}5° \quad \text{és} \quad \beta_2=9°$$

Az (51) egyenlet alapján: $\Delta\Phi_1=14{,}25°$; tehát a kétlépcsős átmenet Φ_1 elektromos hosszának optimális értéke: $\Phi_1=75{,}75°$.

2. Háromlépcső binomiális átmenet méretezése

Téglalap keresztmetszetű tápvonalakból felépült háromlépcsős binomiális átmenet b_i méreteit meghatározó egyenletek [12]:

$$c=\sqrt[4]{\frac{b_4}{b_1}}=\sqrt[4]{4}=1{,}414; \quad \frac{b_2}{b_1}=c \quad \text{és} \quad \frac{b_4}{b_3}=c,$$

amiből $b_2=10{,}25$ mm és $b_3=20{,}50$ mm adódik.

A fenti geometriai méretek esetén a Γ_{i0} reflexiótényezők:

$$\Gamma_{10}=\Gamma_{30}=0{,}1714 \quad \text{és} \quad \Gamma_{20}=\frac{1}{3}$$

Az ugráskapacitások normalizált szuszceptanciája:

$$B_1'=0{,}075; \quad B_2'=0{,}31 \quad \text{és} \quad B_3'=0{,}164.$$

Az m_i együtthatók értéke:

$$m_1=1{,}016; \quad m_2=1{,}042 \quad \text{és} \quad m_3=1{,}073$$

A K_p együtthatók értéke: $K_2\cong 1$ és $K_3=0{,}939$.

Így a bemeneti reflexiótényező abszolútértéke, ha φ_2, $\varphi_3=0$:

$$|\Gamma|=\Big|\,|\Gamma_1|-K_2|\Gamma_2|+K_2K_3|\Gamma_3|\,\Big|=0{,}0003$$

Az ugráskapacitások fázistoló hatásának kompenzációja esetén tehát, gyakorlatilag $|\Gamma|=0$, s így az adott hátomlépcsős binomiális átmenetnél csupán az

ugráskapacitások fázistoló hatásának kompenzációja szükséges. Mivel a (22) és (23) egyenletekből:

$$\alpha_1 = 11{,}5^\circ; \quad \alpha_2 = 19^\circ; \quad \alpha_3 = 24^\circ$$

$$\beta_1 = 2^\circ; \quad \beta_2 = 7{,}5^\circ \quad \text{és} \quad \beta_3 = 4{,}5^\circ$$

az (51) egyenletből: $\Delta\Phi_1 = 8{,}5^\circ$ és $\Delta\Phi_2 = 8{,}5^\circ$.

Az adott háromlépcsős binomiális átmenet Φ_i paraméterének optimális értéke:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 81{,}5^\circ$$

IRODALOM

1. *Collin, E. R.:* Theory and Design of Wide-Band Multisection Quarter Wave Transformers. Proc. IRE; February, p. 197.
2. *Cohn, B. S.:* Optimum Design of Stepped Transmission-Line Transformers. IRE Trans. on MTT, Vol. MTT-3, 1955. April. pp. 16—21.
3. *Riblet, I. H.:* General Synthesis of Quarter-Wave Transformers. IRE Trans. on MTT, Vol. MTT—5, 1965; p. 325.
4. *Solymár L.:* Some Notes on the Optimum Design of Stepped Transmisson-Line Transformers. IRE Trans. on MTT, Vol. MTT—6, 1958. Oktober, pp. 374—378.
5. *Riblet, I. H.:* A General Theorem on an Optimum Stepped Impedance Transformer. IRE Trans. on MTT, Vol. MTT—8, 1960. March, pp. 169—170.
6. *Young, L.:* Tables for Cascaded Homogeneous Quarter-Wave Transformers. IRE Trans. on MTT, Vol. MTT—7, 1960. March, pp. 233—237.
7. *Young, L.:* Inhomogeneous Quarter-Wave Transformers of Two Section. IRE Trans. on. MTT, Vol. MTT—8, 1960. November, pp. 645—649.
8. *Altman, L. I.:* Microwave Circuits. D. van Nostrand Company, INC. 1964. pp. 134—143.
9. *Dr. Csurgay Á.—Markó Sz.:* Mikrohullámú hálózatok. Mérnöki Továbbképző Intézet. 1965. 225—234. oldal.
10. *Kinariwal, K. B.:* Theory of Cascaded Transmission Lines. Proc. of the Symposium on Generalized.Networks. New York, April, 1966. pp. 345—352.
11. *Saita, M.:* Synthesis of Transmission Line Networks by Multivariable Techniques. Proc. of the Symposium on Generalized Networks. New York, April, 1966. pp. 353—392.
12. *Dr. Istvánffy E.:* Tápvonalak, antennák és hullámterjedés. Tankönyvkiadó, 1966. 186—195. oldal.
13. *Gonda Józsefné:* Lépcsős transzformátorok tervezése. TKI. Közleményei, 1967; XII. évfolyam 2. szám.
14. *Dr. Jachimovits László:* Elosztott paraméterű passzív áramkörök. Mérnöki Továbbképző Intézet. 1969. 30—32. oldal.
15. *Marcuvitz N.:* Waveguide Handbook. MIT Rad. Lab. Series McGraw-Hill. Book Comp. New York, 1951. 10. kötet. pp. 307—310.
16. *Dr. Jachimovits L.—Völgyi F.:* Tápvonalak és antennák, példatár I. rész — Tápvonalak. Tankönyvkiadó 1969.

„Epitaxiás félvezető rétegek" szeminárium

A Híradástechnikai Tudományos Egyesület Félvezető Eszközök és Integrált Áramkörök Szakosztálya 1968. november 26. és 27-én másfélnapos szemináriumot rendezett, amelyen az epitaxiás félvezető rétegek kutatásának hazai eredményeiről számoltak be a témán dolgozó szakemberek.

A szeminárium tematikája a következő három tárgyakörre tagolódott:

— az epitaxiás rétegek előállítási technológiája,
— az epitaxiás rétegek vizsgálati módszerei,
— a félvezető eszközök elektromos paraméterei és az epitaxiás felépítés közti összefüggések vizsgálata.

A tizenhat egyenként 20 perces előadást vita követte.

A korszerű félvezető eszközök és integrált áramkörök gyártásában ma már fontos technológiai művelet az epitaxiás rétegnövesztés. Az epitaxia félvezető technológiai alkalmazására vonatkozó kísérletek külföldön mintegy 10 évvel ezelőtt kezdődtek és a hazai kutatásnak is több éves múltja van.

Dr. Szép Iván (HIKI): megnyitó szavaiban méltatta a téma időszerűségét. Hangsúlyozta, hogy az Egyesület fontos feladatot vállalt ezzel a kezdeményezéssel, amely módot ad a különböző munkahelyeken működő kutatóknak tapasztalataik kicserélésére.

A továbbiakban rövid áttekintést adunk az elhangzott előadásokról. Ezek közül néhányat kibővített formában a Híradástechnika közöl.

Az elhangzott előadások sorrendben a következők voltak: *Kürthy Zoltánné, Farkas Miklós* (HIKI): „Epitaxiás berendezés telítőegységében kialakuló szilíciumtetraklorid-hidrogén, gőz-gázelegy koncentrációjának vizsgálata".

A szerzők sav-lúg titráláson alapuló kísérletsorozattal vizsgálták az epitaxiás reaktorba jutó elegy összetételének változását a telítő hőmérséklet, a hidrogén áramlási sebessége, valamint a telítőben levő szilíciumtetraklorid folyadékoszlop magassága függvényében. Meghatározták azokat a körülményeket, amelyek között az elegy koncentrációja állandó. Eredményeik a berendezés tervezésénél és a növesztés gyakorlatában hasznosíthatók.

Dr. Salacz Tamásné (VKI): „Szilícium epitaxiás növesztése oxiddal maszkírozott diffúziós átmenetekre".

Az epitaxiás technológia egyik különleges alkalmazásáról számolt be a szerző. Galliummal diffundáltatott szilícium-alaplemezen csak egy körgyűrűnek megfelelő területen végzett epitaxiás növesztést. A felület többi, szilícium-oxiddal fedett részén polikristályosan levált réteget utólag eltávolította. Ismertette az epitaxiás berendezést, az alaplemez előkészítő műveleteit és a növesztéssel kapcsolatos problémákat.

Dr. Hahn Emil, Kósza Géza (TÁKI): „Többszörös epitaxiás rétegek szennyezés-eloszlása" c. előadását lásd lapunk 1970. 2. sz. 41. oldalán.

Tímár József (HIKI): „Epitaxiás szilícium rétegek növesztése integrált áramkörökhöz" c. előadását lásd lapunk 1970. 1. sz. 17. oldalán.

Motál György, Gál Imre (EIVRT): „Polikristályos epitaxiás rétegek felhasználása oxid-szigetelésű monolitikus integrált áramkörök készítésénél".

A szerzők kritikai áttekintést adtak az integrált áramkörökben alkalmazható szigetelési eljárásokról és konstrukciós megoldásokról. Ismertették saját, szilíciumdioxid szigeteléssel kapcsolatos kutatási eredményeiket. Vizsgálták a szilíciumdioxidon való polikristályos epitaxiás rétegek növesztésének körülményeit, struktúráját és elektromos tulajdonságait. Végül foglalkoztak az oxidszigetelési technika perspektiváival az integrált áramköri elemek készítésénél.

Székely Tamásné, Varga László (TÁKI): „Szilícium epitaxiás rétegek röntgentopográfiás vizsgálatáról" c. előadását lásd lapunk 1970. 2. sz. 48. oldalán.

Kürthy Zoltánné, Stefániay Vilmos (HIKI): „Vastag, erősen adalékolt epitaxiás szilíciumréteg hatása a szilícium alaplemez kristályszerkezetére" és

Stefániay Vilmos, Kürthy Zoltánné: „Epitaxiás szilícium egykristályok görbültségének röntgendiffrakciós topográfiás vizsgálata" című két előadását összevont formában „Mechanikai feszültségek epitaxiás szilíciumkristályokban" címmel közöljük.

Motál György, Gál Imre (EIVRT): „Az epitaxiás réteg rétegződési hibái és e hibák változása a technológia folyamán".

Kormány Teréz, Vértessy Miklós (TÁKI): „Epitaxiás réteghibák vizsgálata fáziskontraszt mikroszkóppal".

A szerzők több mint 250 epitaxiás réteg vizsgálatát végezték el. Ezeket a rétegeket foszfor, arzén, illetve antimon adalékot tartalmazó, kis fajlagos ellenállású szilíciumhordozókon növesztették különböző vastagságban, és fajlagos ellenállásértékeik is különböztek. Bemutatták a jellegzetes hibatípusok fáziskontrasztmikroszkópos felvételeit, tárgyalták a hibák keletkezését befolyásoló tényezőket. Nagyfrekvenciás szilíciumdiódák esetén összefüggést találtak a letörési feszültség csökkenése és bizonyos hibafajták megjelenése közt.

Pfeifer Judit, Gutai László, Haraszthy Éva (MÜFI): „Néhány összefüggés epitaxiás rétegek struktúrája és a bennük kialakított $p-n$ átmenetek elektromos paraméterei között".

A szerzők három (10^{-5}, 10^{-7}, 10^{-9} torr) vákuumtartományban párologtatással állítottak elő germánium epitaxiás rétegeket. Ezeken diffúziós p—n átmeneteket hoztak létre, amelyeket mesa-technológiával diódákká dolgoztak fel. Méréseket végeztek 300 °K és 77 °K hőmérsékleten az áramfeszültség, kapacitásfeszültség karakterisztikák, valamint a kisebbségi töltéshordozó tárolási idejének meghatározására. Az elektromos adatok érzékenyen tükrözték a szerkezet tökéletességi fokát.

Fejes László (HIKI): „Epitaxiás rétegek vastagságának meghatározása infravörös interferencia módszerével".

A gyors és roncsolásmentes módszer erősen adalékolt hordozón növesztett kevesebb adalékot tartalmazó, vékony epitaxiás rétegek esetében alkalmazható. A spektrumot az epitaxiás lemez egyes rétegeinek optikai tulajdonságai befolyásolják. A szerző tárgyalta a módszer fizikai alapjait, majd kísérleti eredmények alapján rámutatott, hogy a mérés csak bizonyos rétegvastagság-határok közt és rétegegyenletesség mellett ad megbízható értékeket.

Gutai László, Szentpáli Béla (MÜFI): „Epitaxiás germánium mintán végzett négytűs mérés egy problémájáról".

A szerzők az alaplemez típusával ellentétes epitaxiás rétegeken végeztek fajlagos ellenállás meghatározásokat. Kísérletekkel bizonyították, hogy nagy rétegellenállású epitaxia esetében a p—n átmenet elektromos szigetelő hatása függ a húzóáramtól. Sem az igen kicsi, sem a nagy húzóáram értékeknél nem kapható meg a réteg valódi fajlagos ellenállása. A p—n átmenet záróirányú előfeszítése révén megfelelő eredményeket értek el.

Takács Dezső (HIKI): „N/N^{+}_{-} epitaxiás szeletek fajlagos ellenállásának meghatározása letörési feszültségből".

Az ún. „háromtűs módszernél" szükséges a letörési feszültség és a fajlagos ellenállás közötti összefüggés meghatározása. A szerző bemutatott egy ismert ellenállású minták segítségével felvett kalibrációs görbét, beszámolt a mérés során szerzett tapasztalatokról, a megbízható mérési eredmények feltételeiről, valamint a módszer korlátairól. Végül foglalkozott a háromtűs módszerrel történő ellenállásprofil felvétel kérdéseivel.

Aczél Judit, dr. Hahn Emil (TÁKI): „Epitaxiás rétegek szennyezettségének meghatározása feszültségkapacitás karakterisztika alapján".

A szerzők a vizsgálandó rétegben igen sekély diffúzióval és mesa-technológiával előállított diódákon méréseket végeztek. Ismertették az adalékeloszlás számítására felhasznált összefüggéseket, a módszer érvényességének feltételeit, majd bemutatták néhány alkalmazását. Meghatározták homogén epitaxiás rétegek adalékszintjét, valamint hiperabrupt profil esetében az adalék eloszlását. Eredményeiket összehasonlították más módszerekkel kapott értékekkel.

Bártfai Pálné, Kocsis Miklós: „Epitaxiás felépítésű félvezető eszközök" című előadását lásd lapunk 1970. 1. sz. 9. oldalán.

Kocsis Miklós

DR. HAHN EMIL—KÓSZA GÉZA—
ACZÉL JUDIT
Távközlési Kutató Intézet

Többszörös epitaxiális rétegek szennyezéseloszlása

ETO 539.219.1 :621.382.002.2 :669.782

Vizsgálatainkat a Távközlési Kutató Intézetben kifejlesztésre kerülő varicap diódák technológiájának kidolgozása érdekében végeztük. S. Nakanuma [1] közleményében arról számolt be, hogy sikeresen alkalmazta az alacsonyhőmérsékletű epitaxiális réteg-építést nagy feszültségérzékenységű varicap-diódák előállítására, és ezzel a hagyományos varicap technológiák, vagyis az ötvözet-diffúziós és kettősdiffúziós eljárások és a pagoda struktúra kialakulása mellé felzárkózott az epitaxiális technológia is, méghozzá a több különböző szennyezettségű és különböző vezetési típusú réteg egymásraépítését biztosító technológia. Ez a technológia az eddigieknél jobb eredményt hozott a feszültségérzékenység területén, ezért választottuk mi is ezt az utat.

A varicap diódák karakterisztikája a dióda szennyezésprofiljától függ, vagyis adott eszköz-paraméterek érdekében meghatározott szennyezésprofilt kell megvalósítanunk. Ehhez elsősorban a szennyezésprofil mérését kell kidolgozni.

Szennyezéseloszlás mérésére számos módszer ismeretes. Ezek közül a legfontosabbak:

— lépcsős marás vagy ferde csiszolat mentén fajlagos ellenállás mérése négytűs, illetve háromtűs módszerrel,
— kettős ferde csiszolat módszere [2],
— már 1942-ben Schottky [3] rámutatott a harmadik lehetőségre, amely szerint félvezetőkben a szennyezéseloszlást meg lehet határozni úgy, hogy kimérjük hogyan függ a kiürített réteg kapacitása az átmenetre adott visszirányú feszültségtől.

Hilibrand és Gold [4], valamint Thomas és munkatársai [5] fel is használták ezt a módszert epitaxiális filmek szennyezéseloszlásának mérésére. Minden szerző megemlíti azonban, hogy a módszer pontossága kb. 20% és a legnagyobb hibaforrás, hogy az átmenet területe kellő pontossággal nehezen határozható meg.

Ezt küszöböli ki T. P. Lee módszere [6], aki a soros ellenállás feszültségfüggéséből határozza meg a szennyezéseloszlást. A módszer független az átmenet területétől és így pontosabb.

Mi a dióda kapacitás-feszültség karakterisztika felvételén alapuló harmadik módszert választottuk profilmérésre, alátámasztva és összehasonlítva a különböző vastagságú rétegek fajlagos ellenállásának mérésével. A vizsgálathoz elkészítendő dióda ugyanis egyben a kidolgozandó diódatípus is lehet, ezért a vizsgálat roncsolásos jellege nem hátrány, mivel egy amúgy is szükséges ellenőrző mérésből megkapjuk a szennyezésprofilt.

Beérkezett: 1969. VII. 31.

A szennyezéseloszlás vizsgálata

Többszörös epitaxiális rétegek szennyezettségének vizsgálata, főleg vékony rétegek esetében legcélszerűbben kapacitás-feszültség karakterisztika alapján történik. A módszer elméleti alapjait Schottky [3], valamint Hilibrand és Gold [4] közleménye tartalmazza. Egyik első alkalmazói Thomas és munkatársai [5].

A módszer lényege, hogy a vizsgálandó rétegből olyan diódát készítünk, amelyben a *p-n* átmenet meredek (abrupt) és aszimmetrikus. A feszültség-kapacitás karakterisztikából a szennyezéseloszlás exakt módon számítható, ha a következő feltételek teljesülnek:

1. az átmenet sík,
2. az átmenetre kapcsolt feszültség csak az átmeneti tartományban esik,
3. a szennyezőatomok ionizáltak,
4. az átmenet egyik oldalán (pl. a *p* oldalon) a szennyezés sokkal nagyobb, mint a másikon.

A 4. feltétel azt jelenti, hogy a kiürített réteg behatolása a nagykoncentrációjú rétegbe elhanyagolható. A számításhoz szükséges összefüggést a Poisson-egyenlet kétszeres integrálása útján nyerjük. A szennyezéseloszlást kifejezve:

$$N(x)=\frac{2}{q\varepsilon A^2}\left[\frac{\mathrm{d}(1/C)^2}{\mathrm{d}\,U}\right]^{-1}=-\frac{C^3}{q\varepsilon A^2}\left(\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}U}\right)^{-1} \qquad (1)$$

ahol: q az elektron töltése,
ε a dielektromos állandó ($\varepsilon=\varepsilon_0\varepsilon_r$),
A a *p-n* átmenet felülete,
x a kiürített réteg szélessége.

Ezzel az összefüggéssel számolva túl nagy hibát követnénk el, mivel a felület, a kapacitás és a derivált meghatározásának hibái együtt jelentkeznek. Ha felhasználjuk az ismert

$$C=\frac{C_0}{\left(1+\frac{U}{\Phi}\right)^n} \qquad (2)$$

összefüggést,

$$N(x)=\frac{(C/A)^2(U+\Phi)}{q\varepsilon n}\,. \qquad (3)$$

Itt Φ a diffúziós potenciál. Ezen összefüggés felhasználása akkor jogos, ha feltételezhetjük, hogy adott U feszültség környezetében az n kitevő állandó. Ezt a gyakorlatban minden számbajöhető esetben megtehetjük. Ha az állandókat behelyettesítjük, a fajlagos kapacitást pF/cm²-ben, a feszültségeket pedig V-ban adjuk meg:

$$N(x)=\frac{(C/A)^2(U+\Phi)}{n}\cdot 6\cdot 10^6 \quad [\mathrm{atom/cm^3}]. \qquad (4)$$

n értékeit úgy határozzuk meg, hogy a kapacitás-feszültség görbét log-log papíron ábrázoljuk és több U értéknél meghatározzuk az érintő iránytangensét. Itt felhasználjuk a (2) összefüggést. Mindkét oldal logaritmusát képezve

$$\log C = K - n \log (U + \Phi). \tag{5}$$

x-et, a kiürített réteg szélességét úgy határozzuk meg, hogy a diódát síkkondenzátornak fogjuk fel, amelynek lemeztávolsága a kiürített réteg szélessége, tehát

$$x = \frac{\varepsilon A}{C}. \tag{6}$$

A vizsgálat kivitelezése érdekében a vizsgálandó rétegből diódákat kell készíteni. A négy feltételnek eleget tevő p-n átmenet igen sekély (0,2—0,3 μ) diffúzióval állítható elő. Ez egyrészt a meredek átmenetet biztosítja, másrészt azt, hogy az egyik oldal szennyezés-koncentrációja sokkal nagyobb legyen. Mivel legtöbbször n típusú réteget állítunk elő, az átmenetet bór diffúziójával hozzuk létre. A diffúziót a szokásos technikával 950—1000 °C-on végezzük, így kb. 10—15 perces diffúziós idő elegendő. Ezután a mezatechnikában szokásos eljárással jól mérhető átmérőjű mezát állítunk elő, és a diódát befoglaljuk.

Ez a rész kívánja a legtöbb gyakorlatot és ügyességet. A mérés pontossága ugyanis igen nagy mértékben függ attól, hogy az átmenet területét milyen pontosan tudjuk meghatározni. Ezért célszerű kör alakú mezát marni, és csak a legszükségesebb méretű kiemelést alkalmazni. Gyakorlati adatok, illetve tapasztalatok szerint a terület mérése átlag 10% hibával lehetséges, a szennyezéskoncentráció bizonytalansága ebből adódóan kb. 20%.

A kapacitásmérést nagy pontosságú híddal (Boonton, Wayne-Kerr) végezzük. Az előfeszültséget nagy stabilitású feszültségforrás szolgáltatja, a szabályozást nagy terhelhetőségű precíziós potenciométer végzi. Kapacitásmérésben bizonytalanságot jelent a szórt kapacitás, illetve annak nem állandó jellege. Az általunk használt foglalat kapacitása 0,2—0,3 pF közt változott, a minimális mérendő kapacitás pedig 5 pF körül volt, tehát a pontosság kb. 5%. Összefoglalva megállapítható, hogy a mérés és számolás hibája kb. 25%. Ha nem lényeges a szennyezéskoncentráció abszolút értéke, csak a lefutás, az elkövetett hiba sokkal kisebb, kb. 10%.

A mérés egyetlen hátránya, hogy destruktív, ezt azonban bőségesen kompenzálja a nyerhető információk nagy jelentősége. Gyakorlatban e hátrány nem is mindig jelentkezik, hiszen a rétegekből rendszerint szoktak diódákat is készíteni, másrészt a mérés részdiódákon is elvégezhető.

Amennyiben az acceptor szennyezéseloszlása (diffúziós) pontosan ismert, mély diffúziós átmenet esetében is meghatározható a réteg szennyezéseloszlása, bár kisebb pontossággal [7].

Ebben az esetben

$$[N_A(x_1)]^{-1} + [N_D(x_2)]^{-1} = [N_T(x)]^{-1}, \tag{7}$$

ahol: $N_T(x)$ a kapacitásmérésből közvetlen számolható szennyezéskoncentráció,

$N_A(x_1)$ az acceptorkoncentráció a kiürített réteg egyik szélén,

$N_D(x_2)$ a donorkoncentráció a kiürített réteg másik szélén.

Ha x_j az átmenet metallurgiai helye, a kiürített réteg határait az

$$\int_{x_1}^{x_j} N_A(\xi)\,d\xi = \int_{x_j}^{x_2} N_D(\xi)\,d\xi \tag{8a}$$

és

$$\int_{x_1}^{x_j} N_A(\xi)\,d\xi = \int_{0}^{x} N_T(y)\,dy \tag{8b}$$

összefüggésekből nyerhetjük, x a kiürített réteg szélessége, ami a kapacitásból számítható.

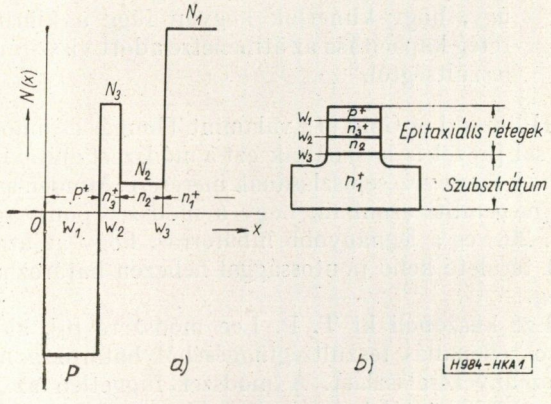
Ez utóbbi összefüggések felhasználásával

$$N_D(x_2) = \frac{N_A(x_1) N_T(x)}{N_A(x_1) - N_T(x)} = \frac{N_T(x)}{1 - \dfrac{N_T(x)}{N_A(x_1)}}. \tag{9}$$

A számolás gépek segítségével elvégezhető, és jó felvilágosítást ad nem csak az epitaxiális rétegről, hanem a diffúziós profilról is

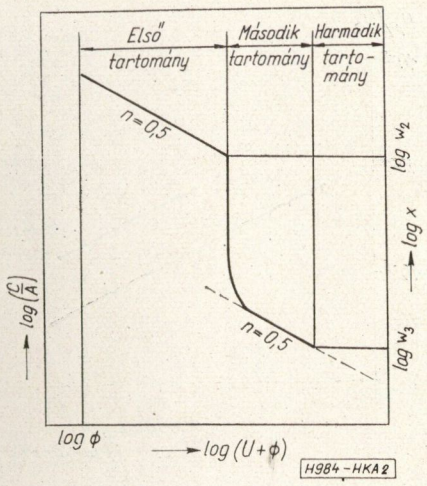
A megvalósítandó szennyezéseloszlás

Ezek után röviden ismertetjük a megvalósítandó szennyezéseloszlást, az úgynevezett hiperabrupt átmenetet. Ez az átmenet olyan, hogy a p-n határfelülettől a $+x$ tengely irányába haladva csökken a szennyezettség (1. ábra). Ehhez az átmenethez a 2.



1. ábra. Ideális $p^+ n_3^+ n_2 n_1^+$ struktúra szennyezéseloszlása

ábrán látható tipikus idealizált kapacitás-feszültség karakterisztika tartozik. A kapacitás-feszültség karakterisztikából adódó n érték ennél az átmenetnél lényegesen nagyobb, mint az egyszerűbb meredek (abrupt) átmenethez tartozó n érték. Az eloszlás megvalósítható n és p típusú alapkristályra épített rétegekkel is (utóbbi esetben p_1^+ szubsztrátumon p_2, p_3^+ és n_4^+ rétegekkel), de mivel az elektronok mozgékonysága nagyobb a lyukakénál, a tiszta réteg célszerűen n típusú legyen.



2. ábra. Az első ábrán látható eloszlás kapacitás-feszültség karakterisztikája

A tiszta réteg szennyezéseloszlása

A tiszta réteg szennyezettsége abszolút értékének megállapításakor kompromisszumot kell kötnünk, mert a nagy jósági tényező nagy n_2 értékeket kíván, a nagy feszültségérzékenységhez viszont nagy n_3^+/n_2 arány és kis (w_2-w_1) szükséges. Ez nagy n_2 értékek esetén nehezen valósítható meg, mert erősen szennyezett n_3^+ rétegben túl kicsi lesz a kiürített réteg szélessége, és így előfordulhat, hogy a letörési feszültség elérése előtt nem éri el az n_2 réteget. Ezért maradjunk közepes, kb. 10 ohmos fajlagos ellenállású és kb. 10 μm vastag tiszta réteg előállításánál, és vizsgáljuk meg, hogyan változik a szennyezettség a tiszta réteg belsejében.

Az alapkristálynak természetesen 0,01—0,001 ohm cm fajlagos ellenállásúnak kell lennie a kis soros ellenállás érdekében. Először is ki kell dolgoznunk ilyen nagy fajlagos ellenállású rétegek előállítási technológiáját.

Megvizsgáltuk különböző fajlagos ellenállású P-ral doppolt alapkristályokra 1225 °C-on növesztett, átlag 6,5 μm vastag epitaxiális Si rétegek szennyezettségét, és a 3. ábrán látható eredményeket kaptuk. A rétegek szennyezettségét háromtűs fajlagos ellenállásmérésből határoztuk meg Irvin táblázatai [8] alapján, és ábrázoltuk az alapkristály szennyezettségének függvényében. Megállapíthatjuk, hogy jó közelítéssel érvényes a következő összefüggés:

$$Nr=k\cdot Na^z=4{,}5\cdot 10^{13}\cdot Na,^{\frac{1}{2,1}} \qquad (10)$$

mivel a 3. ábra alapján

$$k=4{,}5\cdot 10^{13}$$

és

$$z=\frac{1}{2{,}1}\,.$$

Ez azt jelenti, hogy az epitaxiás Si rétegek szennyezettsége P-ral doppolt alapkristályok esetében az ismertetett kísérleti körülmények között jó közelítéssel az alapkristály szennyezettségének négyzetgyökével növekszik.

Az ábrából azonban az is kiderül, hogy ilyen rétegépítési paraméterekkel csak kb. 1 ohmcm-es, P-ral doppolt alapkristályra tudunk a feladatnak megfelelő tisztaságú réteget építeni, ami nem megfelelő.

Mivel a tiszta (nem doppolt) rétegek szennyezettségét az úgynevezett autodoppolás határozza meg (természetesen alapvetően fontos a Si-halogenid tisztasága is!), W. H. Shepherd [9] közleménye alapján megvizsgáljuk, hogyan befolyásolják az autodoppolás mértékét a rétegépítés körülményei. Fenti szerző szerint a film/szubsztrátum doppolási aránya:

$$\frac{N_r}{N_a}=\frac{\text{konst}\cdot A\cdot\Theta\cdot f(t)}{H'\left(\frac{G}{\psi'_D}+\gamma\right)}\,, \qquad (11)$$

ahol: N_r és N_a a doppolóanyag pillanatnyi atomkoncentrációja a Si felületén, illetve a doppoló kezdeti koncentrációja a szubsztrátumban,

$$\Theta=\frac{\lambda\cdot\psi_D\cdot\gamma}{D}\quad \text{cm/sec} \qquad (12)$$

$\lambda\cdot\psi_D$ effektív átviteli koefficiens a lemez hátsó feléről történő elpárolgás esetére,

$\lambda<1$ azaz a felületről gyorsabb a párolgás, mint a hátsó oldalról,

ψ_D gáz alakú transzport-koefficiens a szelet tetejéről történő párolgásban,

γ a doppoló aktivitási koefficiense (szilárd fázisban), csak a hőmérséklettől függ,

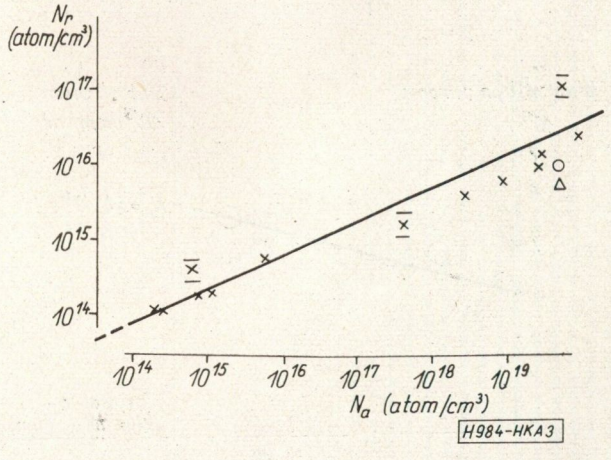
D a doppoló diffúziós koefficiense Si-ban.

$$0\leqq f(t)\leqq 1 \quad \text{ha} \quad 0\leqq t\leqq\alpha.$$

A növekedés körülményeinek állandó sorozatára leírja a profilt a filmben.

H' [l/perc] a H_2 áramlási sebessége,
G [μ/perc] a Si növekedési sebessége,
ψ'_D [μ/perc]$=\psi_D$.

Látható, hogy minél kisebb N_r/N_a értékre kell törekednünk, mert ez jelenti az erősen adalékolt szub-



3. ábra. A szubsztrátum és a réteg szennyezettsége közötti összefüggés. A szubsztrátum foszforral szennyezett, ○ a nagyobb hidrogénsebességgel, △ a hosszabb ideig növesztett réteg szennyezettségét jelöli

sztrátumon a tiszta réteget. Az ehhez szükséges kísérleti körülmények az egyenletből leolvashatók: kis felület, nagy H_2 sebesség, nagy rétegépülési sebesség, kis transzport-koefficiens a szelet tetejéről és nagy rétegépítési idő. Ugyanis $f(t)=\left(\frac{t}{D}\right)^{1/2}$ és a diffúziós egyenletet a doppolónak a szubsztrátumból való elpárolgására megoldva:

$$F_D=\Theta N_a \exp x^2 \operatorname{erfc} x, \qquad (13)$$

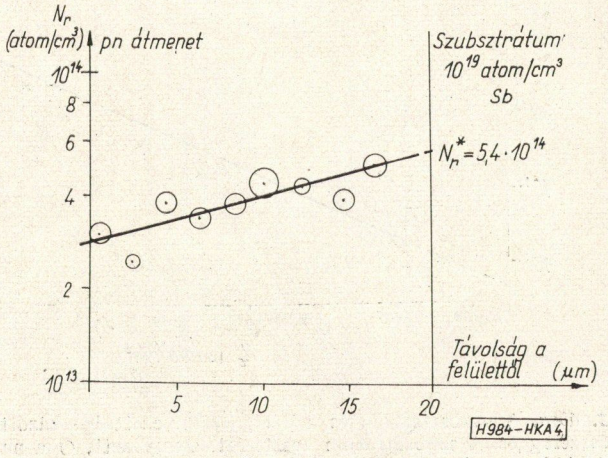
amit ha az $x=\Theta(t/D)^{1/2}$ jelölést bevezetve x függvényében ábrázolunk látjuk, hogy ha $x<0{,}1$, $f(t)=1$, vagyis az autodoppolás szintje időtől független, és ha $x>1{,}0$, $f(t)=1/2x$, azaz az autodoppolás $t^{-1/2}$-nel lesz arányos bizonyos idő múlva, amikor a doppoló a felületről olyan gyorsan párolog, mint diffundálni képes. Ekkor a szilárd fázisú diffúzió lesz a sebességmeghatározó lépés. Közelítő számítások szerint As és Sb esetén az időtől független szakasz, amikor az N_r nem különbözik lényegesen N_a-tól, olyan rövid, hogy nincs gyakorlati jelentősége. Ez is azt indokolja, hogy a feladathoz As-nel vagy Sb-nal adalékolt szubsztrátumot kell felhasználnunk. Ezenkívül ezt a követelményt támasztja alá az a tény is, hogy az elméletnek megfelelő változásokat eszközölve (nagyobb hidrogén sebesség, hosszabb idő) 0,0017 ohmcm-es, P-ral doppolt alapkristályon nem tudtunk túllépni az 1 ohmcm-es tisztaságot (lásd 3. ábra).

Ezért néhány-ezred ohmcm-es fajlagos ellenállású Sb-mal adalékolt szubsztrátumokra −10 °C, 50 ml/p, 1050 °C kísérleti körülmények között különböző vastagságú rétegeket növesztettünk. A rétegépítési idő változtatásával és a háromtűs módszerrel mért fajlagos ellenállásokból kiszámítottuk a rétegek szennyezettségét különböző vastagságokban, majd az előbb leírt módon felvettük ezek kapacitás-feszültség karakterisztikáját és ebből meghatároztuk a szennyezésprofilt, amely a 4. ábrán látható.

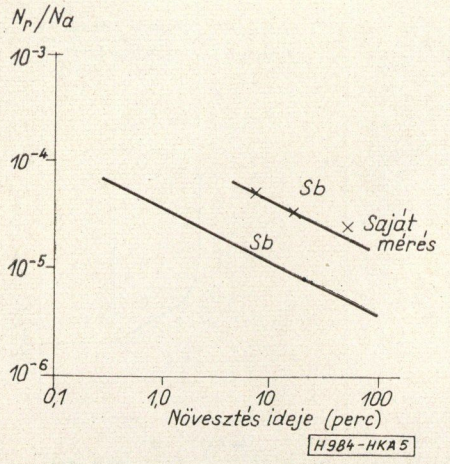
Kiszámítottuk az egyenes meredekségét, $\Phi=0{,}042\mu m^{-1}$, ami jó egyezésben van Thomas és munkatársai [5] által közölt 1050 °C-os értékkel (0,040 μm^{-1}).

A meredekség definíciója [5] alapján:

$$-\Phi=-\frac{\partial \ln N}{\partial x}=-0{,}042 \quad [\mu m^{-1}]. \qquad (14)$$



4. ábra. Tiszta réteg szennyezéseloszlása antimónos szubsztrátum esetében



5. ábra. Az autodoppolási tényező függése az időtől

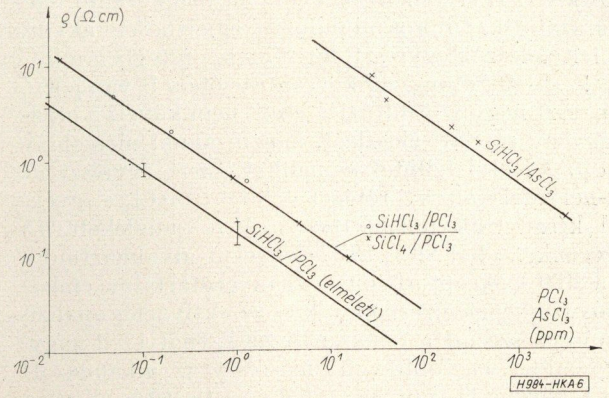
E mérésekből az N_r/N_a hányadost a hőntartás idejének függvényében vagy hosszú idők esetén a rétegvastagság függvényében ábrázolva, valóban megkapjuk a $t^{-1/2}$ függést, azonban az említett szerző által Sb-ra számolt egyenes felett, azzal párhuzamosan helyezkedik el (5. ábra). Ennek oka feltehetően az általunk használt $SiCl_4$ kisebb tisztasági fokában keresendő.

A szennyezésprofilból látható, hogy 5 μm-nél vastagabb rétegek esetén, antimonos alapkristályt használva, a rétegek szennyezettsége 4...5·10^{14} atom/cm³ alatt marad, ami követelményeinknek megfelel, és a szennyezéseloszlás gyakorlatilag az egész rétegvastagság mentén egyenletes, a szubsztrátum felé enyhén emelkedő.

Doppolt (n_3^+) rétegek előállítása

Eszközünk érdekében a fenti módon előállított tiszta rétegre adalékolt n^+ réteget kell növesztenünk. Ehhez felhasználhatjuk régebben közölt eljárásunkat [10] epitaxiális Si rétegek adalékolására $SiHCl_3/PCl_3$ elegyből. Ezt kiterjesztettük alacsony, 1000 °C körüli hőmérsékletekre is, az oldatdoppolási technológia megtartásával, $SiCl_4/PCl_3$ és $SiHCl_3/AsCl_3$ elegyekkel való adalékolásra. Ez a szennyezések szilárdfázisú diffúziójának visszaszorítása miatt lényeges, ugyanis ha magas hőfokon építjük az n^+ réteget, akkor az n/n^+ átmenetek meredeksége romlik, ami lehetetlenné teszi a nagy kapacitásátfogást. S. Nakanuma szerint jó kristályszerkezetű rétegek építhetők alacsony hőmérsékleten, ha az úgynevezett befedési technikát alkalmazzuk. Ez azt jelenti, hogy közvetlenül az alacsony hőmérsékletű növesztés előtt 0,2 μm-nél vastagabb réteget választunk le a szubsztrátumra, mert az epitaxiális növesztés számára nincs jobb felület, mint a frissen növesztett réteg. A befedett felület és az alacsony hőfokon növesztett réteg határfelületén nem keletkeznek illeszkedési hibák.

Megvizsgáltuk különböző PCl_3 és $AsCl_3$ tartalmú $SiHCl_3$, illetve $SiCl_4$ elegyekből készített különböző vastagságú epitaxiális Si rétegek fajlagos ellenállását négytűs módszerrel és ebből szennyezettséget számoltunk. Nagy tisztaságú p típusú szubsztrátumra építettük a rétegeket, hogy a négytűs mérés elvégez-



6. ábra. A rétegek szennyezettségének függése a szilíciumhalogenidekben levő adalékanyagok mennyiségétől

hető legyen. A kísérleti eredmények a 6. ábrán láthatók.

PCl_3-os doppolásoknál akár $SiCl_4$-gyel, akár $SiHCl_3$-mal végezzük, a mérési pontok egy egyenesre esnek. Az $AsCl_3$-dal adalékolt rétegek esetében mintegy 183-szor annyi $AsCl_3$-ot kell a $SiHCl_3$-hoz elegyíteni, mint a P-os doppolásnál PCl_3-ot ahhoz, hogy mindkettőből kb. 0,1 ohmcm-es réteg épüljön. Ez az $AsCl_3$ és PCl_3 közötti tenziókülönbséggel magyarázható.

A görbék ellenőrzéséhez felhasználtuk a kettős rétegekről leolvasott n^+ értékeket abban az esetben, ha a diffúzió mélysége sokkal kisebb volt az n^+ réteg vastagságánál.

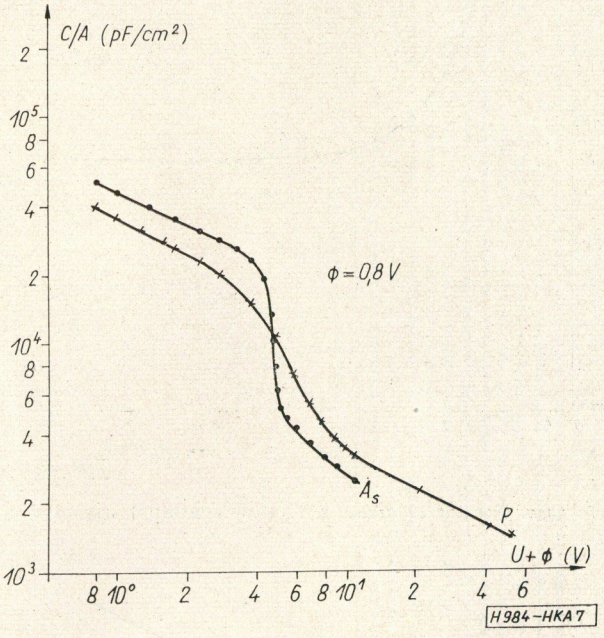
Szennyezéseloszlás a tiszta (n_2) réteg és az adalékolt (n_3^+) réteg határfelületén

A tiszta (n_2) és adalékolt (n_3^+) rétegek egymás utáni építésével, majd ezt követő B diffúzióval úgynevezett hiperabrupt diódákat készítettünk, méghozzá minden kristályból minimálisan 10 darabot, és az ezeken végzett mérések eredményeinek átlagértékét fogadtuk el a kristályra jellemző értékként.

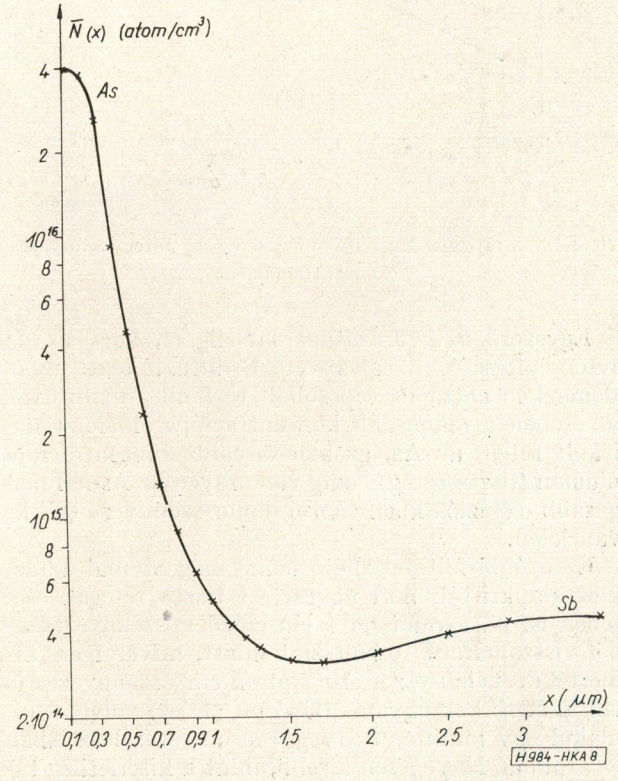
A 7. ábrán feltüntettünk egy P-ral és egy As-nel adalékolt n_3^+ réteggel ellátott kristályból készített diódák fajlagos kapacitásainak átlagértékeit a visszfeszültség függvényében. A 8. és 9. ábrán az ezekből számított szennyezéskoncentráció-eloszlásokat mutatjuk be. A mérésekből a tiszta rétegek nagyobb mélységéig számítható a szennyezéseloszlás, azonban ezt már az előzőekben tárgyaltuk (4. ábra), ezért itt csak az n_2/n_3^+ átmenet környezetét ábrázoltuk. Ilyen típusú diódák szennyezett rétegének felső szintjéből csak mintegy 0,1—0,2 μm-es tartomány mérhető, ha ezt növelni akarjuk a letörési feszültség rohamosan csökken. Az adalékolt réteg felső szintje szabja meg a diódák fajlagos kapacitását 0 V előfeszültségen.

A (4) egyenlet alapján a dióda fajlagos kapacitása $N_3^+(x)$ négyzetgyökével arányos. Az átlagos szennyezés eloszlás-görbékről leolvasott N_3^+ értékeket a hozzá juk tartozó fajlagos kapacitásokkal a 10. ábrán tünt ettük fel, az egyenes az elméleti összefüggést mutatja.

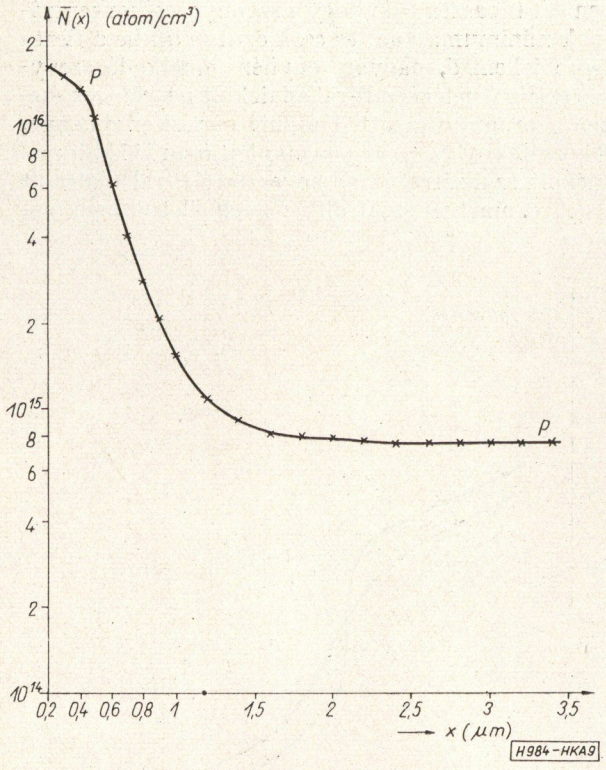
A tiszta és adalékolt rétegek közötti átmeneti tartomány viszonylag szűk, a p-n átmenettől számított 1 μm-en belül általában elérjük a tiszta réteg szennyezettségi szintjét. As-nel adalékolt n_3^+ rétegek esetében azt tapasztaltuk, hogy a szennyezés-koncentrációnak minimuma van, és csak ezután áll be a tiszta rétegre jellemző, nagyon enyhén emelkedő szennyezettség. A jelenség P-ral adalékolt n^+ rétegek esetében nem mutatkozott. Hasonló mérési eredményeket közöltek A. S. Grove és munkatársai [11] Sb-mal adalékolt szubsztrátumra növesztett P-ral adalékolt rétegekre, amelyet saját diffúziós elméletük nem magyaráz.



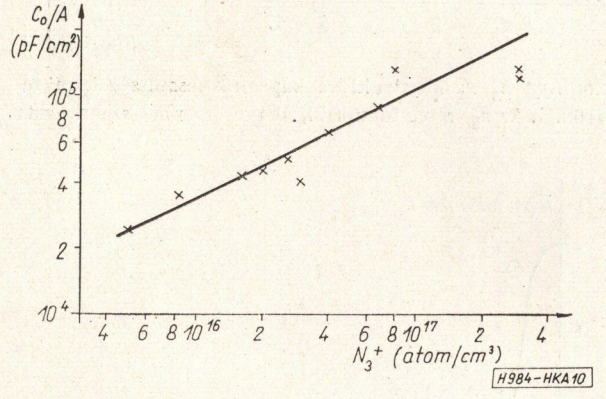
7. ábra. $p^+ n_3^+ n_2 n_1^+$ struktúra kapacitás-feszültség karakterisztikája. Az n_3^+ réteg foszforral, illetve arzénnel szennyezett



8. ábra. Arzén eloszlása a 7. ábra adataiból számolva



9. ábra. Foszfor eloszlása a 7. ábra adataiból számolva



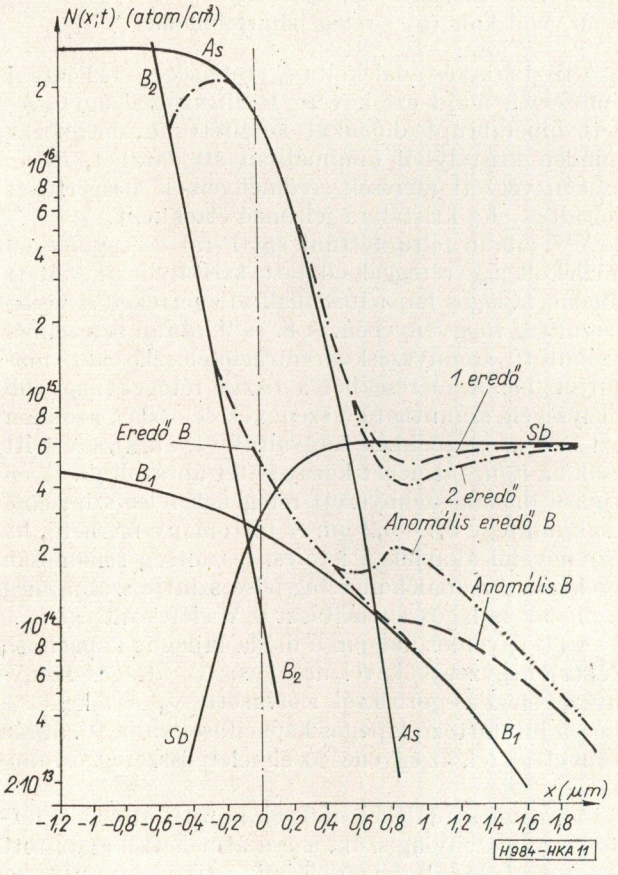
10. ábra. A fajlagos kapacitás függése az n_3^+ réteg szennyezéskoncentrációjától

Egyszerű magyarázatnak látszik az, hogy az n_3^+ réteg építése és az ezt követő B diffúzió alatt olyan donor-koncentráció lépcsőből történik a diffúzió, amelyben a magasabb koncentrációjú oldalon (adalékolt réteg) az As, az alacsonyabb koncentrációjú oldalon (tiszta réteg) pedig valamilyen az As-nál magasabb diffúziós koefficiensű donor-szennyező (pl. P) van jelen.

Ez utóbbi feltételezhető lenne még Sb-mal adalékolt alapkristályokra növesztett tiszta rétegek esetében is, pl. a rendszer falán előző P szennyezésekből visszamaradt foszforszint miatt, mivel igen kis mértékű, néhányszor 10^{14} atom/cm³ szennyezésről van szó. Ekkor ugyanis (lásd pl. (12)-t) valóban kialakul egy minimum a végső szennyezéseloszlásban ez azonban lényegesen kisebb, mint a kísérletileg tapasztalt, a magyarázat tehát nem kielégítő.

A kísérleti eredményeket jobban megközelítő magyarázatot kapunk a minimum megjelenésére akkor, ha feltételezzük egyrészt, hogy az n_3^+ rétegben mintegy $2...5 \cdot 10^{14}$ atom/cm³ koncentrációban B van jelen, másrészt hogy a B diffúziós profil nem követi a hibafüggvény szerinti eloszlást, hanem annál mélyebbre hatol. Az első feltétel fennállhat, mert egyrészt az As-nel adalékolt n_3^+ rétegeket $SiHCl_3/AsCl_3$ elegyekből készítettük (ellentétben a P-ral adalékolt n_3^+ rétegekkel, ahol $SiCl_4/PCl_3$ elegyeket alkalmaztunk), és a $SiHCl_3$ akceptor-típusú szennyezőtartalma emissziós színképelemzési adatok és az aktivációs analízis tanúsága szerint a felhasznált $SiCl_4$-énál 1—2 nagyságrenddel nagyobb volt, másrészt az alkalmazott $AsCl_3$ házilag készült As_2O_3-ból és a tisztítás ellenére maradhatott benne B.

A második feltétel bizonyíthatóan fennáll. Számos szerző szerint ugyanis [13, 14, 15, 16, 17] a III. és V. csoportbeli elemek anomálisan gyors diffúzióját okozhatja a nagy szennyezéskoncentráció a kristályban, amelybe a diffúzió történik, a felületi károsodott réteg, a kristályhibák és belső feszültségterek, valamint a „push out" effektus [14, 13]. Ez utóbbinak lényege, hogy egy III. oszlopbeli elem diffúziója után V. oszlopbeli elemet diffundáltatunk nagyobb koncentrációval. Ekkor az akceptor diffúzió sebessége megnő, mintegy tovább löki az utána következő donor-diffúzió. Ennek valószínű oka, hogy a vakanciamechanizmusú diffúzió (mint pl. a B, P stb.) sebessége függ a kristályhiba-sűrűség, illetőleg a feszültségek (amelyeket a doppolóanyag jelenléte is okoz-



11. ábra. Vázlat a minimum megjelenésének magyarázatához

1. táblázat

Minta száma	n_3^+ réteg szennyezője	$\overline{N_2}$ atom/cm³	$\overline{N_3^+}$ atom/cm³	$\overline{N_3^+}/\overline{N_2}$	$\overline{\Phi}$ μm^{-1}	$\overline{\frac{C_0}{A}} \cdot 10^4$ pF/cm²	$\overline{\frac{C_0}{C_{10}}}$
1	P	$6 \cdot 10^{14}$	$1{,}6 \cdot 10^{16}$	27	4	4,3	13
2	P	$9 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$	5,6	2,5	2,4	7,3
3	P	$8 \cdot 10^{15}$	$8 \cdot 10^{16}$	10	8,4	13	8,7
4	As	$5{,}5 \cdot 10^{14}$	$2{,}6 \cdot 10^{16}$	47	11	5	20,4
5	As	$7 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{16}$	57	10	6,7	19
6	As	$2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{16}$	10	7,4	4,5	12

hat) nagysága megváltozásának ütemétől, mert ezek vakanciaszám-változással járnak.

Az előbbi feltételeket elfogadva kiszámítottunk először egy hibafüggvény szerinti eloszlást Sb-mal adalékolt alapkristályra növesztett tiszta és As-nel adalékolt n_3^+ rétegből és B-diffúzióból álló rendszerre (11. ábra kihúzott vonal). A diffúziós együttható függését a szennyezettségtől [17] alapján vettük figyelembe. Ezután a donorszintek összegéből kivonva az eredő akceptorszintet, minimumgörbét kapunk (1. eredő). Ha a második feltételezésnek megfelelően, most már csak kvalitatíve berajzoljuk az ábrába az említett okok miatt beljebb diffundált B profilt (anomális B) és ennek figyelembevételével képezzük az eredő szennyezéseloszlás görbéjét (2. eredő), a tapasztalattal még jobban egyező minimumot kapunk. A keletkező minimumok helye és nagysága adott donorkoncentrációeloszlás esetén az eredő bórszinttől függ, amit az anomália mértéke és az n_3^+ rétegbeli B-profil határoz meg.

A minimumok megjelenéséből tehát indirekt úton arra következtethetünk, hogy az adalékolt rétegben magasabb a B koncentráció, mint a tiszta rétegben, és az átmeneti tartományban anomálisan gyors a diffúzió, ami valószínűleg a kristályhiba-sűrűség változására vezethető vissza.

Végül összehasonlítjuk az As-nel és P-ral adalékolt n_3^+ réteges kristályokból készített hiperabrupt diódákat. Ehhez készítettük az 1. táblázatot, amelyen feltüntettük a szennyezésprofilokból leolvasható tiszta és adalékolt rétegek szennyezettségének átlagértékeit, a profil meredekségét az n_2/n_3^+ átmenet kezdetén, és a kapacitásadatokat. A táblázat és a 7. ábra alapján megállapítható, hogy az As-nel adalékolt n_3^+ rétegekből készített diódák kapacitásfeszültség karakterisztikája és szennyezésprofilja meredekebb, kapacitásátfogása (C_0/C_{10}, azaz a 0 és -10 V előfeszültségekhez tartozó kapacitások hányadosa) pedig nagyobb, mint a P-os rétegekből készült diódáké. Ennek magyarázata az As kisebb diffúziós együtthatójában rejlik, ami lehetővé teszi meredekebb profilok készítését. A 0V feszültséghez tartozó fajlagos kapacitások csak a szennyezéskoncentráció függvényei, nem függenek a szennyező minőségétől.

A diffúziók elvégzéséért, továbbá értékes tanácsaikért és segítségükért a szerzők köszönetet mondanak Nagy László és Vértesy Miklós kollégáknak.

IRODALOM

1. *Nakanuma, S.:* IEEE Trans. on El. Dev. Vol. ED—13, No. 7. 578. (1966)
2. *Sils, V.—Berkstresser, R. W.—Wang, P.—Longo, T. A.:* Electrochem. Technol. Vol. 2. No. 5—6. 138. 1964.
3. *Schottky, W.:* Z. Physik, 118, 539. 1942.
4. *Hilibrand, J.—Gold, R. D.:* RCA Rev. 21, 245. 1960.
5. *Thomas, C. O.—Kahng, D.—Manz, R. C.:* J. El.-chem. Soc. 109. 11. 1055. 1962.
6. *Lee, T. P.:* IEEE Trans. on El. Dev. Vol. ED—12, No. 8. 457. 1965.
7. *Decker, D. R.:* J. Electrochem. Soc. Solid State Science, Vol. 115, No. 10. 1085. 1968.
8. *Irvin, J. C.:* Bell System Techn. J. Vol. 41. 387. 1962.
9. *Shepherd, W. H.:* J. Electrochem. Soc. Vol. 115. No. 6. 652. 1968.
10. *Pintér J.—dr. Hahn E.—Kósza G.:* Finommechanika, 6. 129. 1967.
11. *Grove, A. S.—Roder, A.—Sah, C. T.:* J. Appl. Phys. Vol. 36. No. 3. 802. 1965.
12. *Runyan, W. R.:* Silicon Semiconductor Technology. Texas Instruments Electronics Series, McGraw-Hill, 1965. 124.
13. *Willoughby, A. F. W.:* J. of Materials Science, 3. 89. 1968.
14. *Nicolas, K. H.:* Solid State El. 9. 35. 1966.
15. *Tannenbaum, E.:* Solid State El. 2. 123. 1961.
16. *Vértesy M.:* TKI közlemények (megjelenés alatt).
17. *Nagy L.—Kormány T.—Varga L.-né—Vértesy M.:* Híradástechnika, XVIII. No. 11. 346. 1967.

SZÉKELY TAMÁSNÉ — VARGA LÁSZLÓ
MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézet
TORNAY IMRE
Egyesült Izzólámpa és Villamossági RT

Szilícium homoepitaxiális növesztése közben keletkező kristályhibák vizsgálata

ETO 548.4:548.52:669.782—172

Félvezető eszközök elektromos paramétereinek időbeli stabilitása, illetve a gyártás során bekövetkező szórása nagymértékben függ a kialakult kristályhibák minőségétől és mennyiségétől, pontosabban ezek gyártás közbeni — nem befolyásolt — kialakulásától. Már G. H. Schwuttke [6] felhívta a figyelmet arra, hogy a rácshibák nem az alapkristály révén kerülnek be a félvezető eszközökbe, hanem főleg a kristályon végrehajtott egyes technológiai műveletek során képződnek. A hibasűrűséget mindig a lehetséges minimális szinten kell tartani, mert a hibakoncentráció a gyártási folyamat közben csak növekedhet, annak csökkentésére egyelőre nincs mód.

Epitaxiális növesztés közben is sok hiba keletkezhet, elsősorban a növesztett rétegben, de az alapkristályban is. A hibák tömeges és nem befolyásolt képződését csak akkor lehet elkerülni, ha a keletkezés okait, illetve mechanizmusát jól ismerjük. Ebben a dolgozatban az volt a célkitűzésünk, hogy a 10—30 μm vékony, de az egész, kb. 4 cm^2-nyi kristályszeletre kiterjedő Si epitaxiális réteg növesztése közben képződő hibákat megfigyeljük.

Homoepitaxiális növesztés közben kialakuló hibaszerkezetekről több munka ismeretes, amelyek közül S. Mendelson [4, 5] és G. R. Booker [1] cikkeit, hazai viszonylatban a vastag epitaxiális rétegre vonatkozó Kürthy J.—Stefániay V. [2] dolgozatát kívánjuk megemlíteni. A tárgykörből összefoglaló tanulmányt Székely T. [8] készített. Jelen dolgozatban elsősorban azokat az epitaxiális növesztés során képződő hibákat mutatjuk be részletesebben, amelyek az említett munkákban nem szerepelnek.

Az általunk alkalmazott vizsgálati módszerek ismertek A. R. Lang [3], G. H. Schwuttke [6], Szántó I. [7], Székely T. [8], Székely T.—Varga L. [9], valamint Varga L. [10] munkái alapján. A röntgentopográfiát és az interferenciakontraszt mikroszkópiát roncsolásmentes jellegük miatt részesítettük előnyben. A növesztett rétegek vizsgálata során szelektív kémiai maratással is előhívtunk hibaszerkezeteket. Lokális hibák (tripiramisok stb.) vizsgálatára mikronyalábos Laue-technikát is alkalmaztunk.

Kísérleti eljárás

A szilícium-kristály homoepitaxiális növesztése viszonylag magas hőmérsékleten (1200...1300 °C) áramló, agresszív kémiai közegben történik. A hőközlés, a hővezetés, a sugárzás, az áramló gázok, a kémiai reakció stb. következtében kialakuló dinamikus egyensúlyi vagy ettől csak kissé eltérő állapotban növekedik a kristály. A környezet mind az alapkristályra, mind a frissen növesztett rétegre hat, de nem hanyagolható el az alapkristály és az ettől kissé eltérő réteg kölcsönhatása sem. Az alap- és a növesztett réteg rendszerint eltérő ötvözéssel készül, így változhat a rácsparaméter és elsősorban a hőtágulási együttható stb., sőt e paraméterek vagy a hőmérsékleteloszlás inhomogenitása is kialakulhat. E tényezők hatására olyan feszültségtér jöhet létre, amely kristályhibákat kelt. Így a diszlokációforrások működésbe léphetnek, rétegződési hibák képződhetnek stb.

Az alapkristályban meglevő hibák is befolyásolják a növesztett réteg szerkezetét. Pl. a növesztés felületén végződő diszlokációk az epitaxiális rétegben is folytatódnak, és az új felületen végződnek, vagy pedig feszültségtér hatására az átmeneti rétegbe is begörbülhetnek. Jó minőségű réteg növesztése érdekében tehát arra kell törekedni, hogy a növesztés síkjában a lehető legkisebb legyen a hibakoncentráció, és ez optimális legyen a növesztett réteg illeszkedése szempontjából. Az alapkristálytól jelentékenyen nem különböző réteg növesztése során a növesztés síkjában hibátlan rácsszerkezet előállítására kell törekedni. Ez elsősorban úgy érhető el, hogy a szelet megmunkálásából visszamaradó felületi deformációt elkerüljük, és felület szennyeződését megakadályozzuk.

A kísérletek során 0,008 ohmcm-es *n* típusú 0,23... 0,24 mm vastag, 25 mm átmérőjű, (111) orientációjú Si kristályszerkezetre 0,010...0,030 mm-es határok között különböző vastagságú, doppolás nélküli réteget növesztettünk $SiCl_4$ hidrogénes redukciója segítségével, 1250...1280 °C hőmérsékleten. A növesztés előtt száraz sósavgázzal „in situ" maratást alkalmaztunk. A kristályszerkezeteket a növesztési kísérletek előtt is kitettük a növesztés alatt fellépő hőhatásnak, de eközben az epitaxiális réteg képződését megakadályoztuk. Az oxidáció kiküszöbölésére azonban itt alkalmaztuk az „in situ" maratást. Ennek, az ún. „vak" próbának célja volt eldönteni, hogy a képződő hibaszerkezetet okozhatta-e a hőmérsékletgradiens következtében kialakuló feszültségtér.

Egymással párhuzamosan 4 szeletet vizsgáltunk. A szeletek mindkét felületét csiszoltuk, políroztuk, majd maratással eltávolítottuk az abrazív réteget. A felületek interferenciakontraszt mikroszkópon hibátlanok voltak. Az így előkészített szeletek középső, 8×12 mm^2-es szakaszát figyeltük Lang-felvételek se-

Beérkezett: 1969. VII. 31.

gítségével. A felvételek ugyanarról a kristálytartományról készültek, amelyeket a későbbiek során is vizsgáltunk. A transzmissziós topogramokat a $(2\bar{2}0)$ reflexió, $AgKa_1$ (50 kV, 300 μA) sugárzás segítségével készítettük. Az Eötvös Loránd Tudomány Egyetem Kísérleti Fizikai Intézetében előállított Lang-kamerát Hilger gym. mikrofókuszú sugárforrással tápláltuk. Az Ilford L4 50 μm-es emulzióvastagságú fotólemezre mm-ként 1 órát exponáltunk.

A kiindulási állapot topográfiai rögzítése után a kristályszeleteket a leírt módon hőkezeltük (vakpróba), majd az előbbi helyről újabb Lang-felvételt készítettünk. Ezután történt a homoepitaxiális növesztés, amelyet ismét topográfiás vizsgálat és interferenciakontraszt mikroszkópos megfigyelés követett. A mikroszkópon megfigyelt lokális hibákról 400 μm átmérőjű „fehér" röntgensugárnyaláb segítségével (30 kV, 25 mA) elsőreflexiós Laue-felvételt készítettünk 3 cm-es kristály-film távolsággal. Ez után szelektív kémiai maratással előhívtuk a felület hibaszerkezetét, amelyet mikroszkópon figyeltünk meg. Végül maratással eltávolítottuk a növesztett réteget az alapkristályban levő hibák elkülönítése céljából. Az így elkészített mintáról ismét topogramot készítettünk.

Az előző kísérletsorozatot újabb 2 db mintán megismételtük a „vak" hőkezelési próba kivételével. Az újabb kísérletsorozatban a felületek mechanikai előkészítése során az eltávolított rétegvastagságokat csökkentettük. Ebben az esetben a durvább csiszolási fokozat mélyebben fekvő deformációs nyomait nem távolítottuk el a kristályról, bár törekedtünk az interferenciakontraszt-mikroszkópon megfigyelhető tökéletesen sík felületre. A karcok nyomait ilyen esetben csak a topogramokon lehet megfigyelni, mikroszkópon nem, legfeljebb csak szelektív kémiai maratás után.

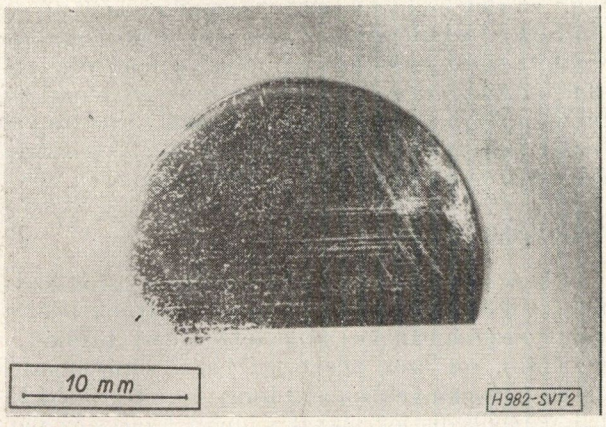
A vizsgálat eredményei

A vizsgált Si kristályok rácshibakoncentrációja igen kicsi volt, a diszlokáció sűrűsége $1-10^3$ vonal/cm^2. A hibák már a kiinduló állapotban egyenlőtlenül helyezkedtek el. A hibasűrűség három nagyságrendű változását nem minden kristályban lehetett tapasztalni. A további megfigyeléseinket *a)* feltorlódott diszlokációk, *b)* rétegződési hibák, *c)* alapkristály felületi hibák vizsgálata köré csoportosítjuk.

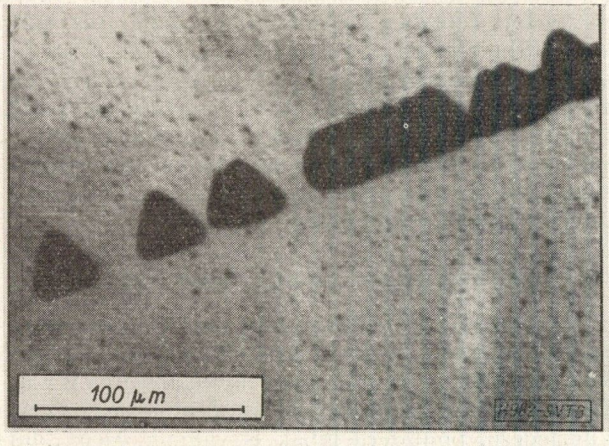
Feltorlódott diszlokációk

Feltorlódott diszlokációsorokat az (111) vágási, illetve növesztési síkkal szöget bezáró másik három multiplikált, {111} csúszási síkban tapasztaltuk. Azonos csúszási síkban felhalmozódott diszlokációkat mutat az 1. ábra epitaxiális növesztés esetében. Ezek a diszlokációk közel párhuzamosak, és bizonyos esetekben egymástól való távolságuk eltér a feltorlódott diszlokációknál várható értékektől. Ilyenkor valószínűleg más, pl. mikroinhomogenitásból eredő terek zavarhatják a diszlokációk feszültségterét. A diszlokációk gyakran a növesztési és saját csúszósíkjuk metszésvonalára közel merőlegesen helyezkednek el (minimális hossz). Feltorlódott diszlokációkat leg-

1. ábra. Feltorlódott diszlokációk Si egykristályban homoepitaxiális növesztés után. Lang-felvétel



2. ábra. Szelektív kémiai maratással előhívott diszlokációk epitaxiálisan növesztett Si egykristály felületén



3. ábra. Feltorlódott diszlokációk maratási képe. A 2. ábrán bemutatott próbafelület egy nagyított részlete

többször már kiinduló állapotban is lehetett a kristályokban találni, de ezekben a kevesebb zavaró feszültségtér miatt viszonylag távol is vannak egymástól diszlokációk, így nehéz a csúszási síkokat azonosítani. Csak hőkezelés hatásra (vakpróba) a rácshibakonfigurációk, elsősorban ezek a feltorlódott diszlokációk nem rendeződnek át jelentékenyen. A 2. ábra a növesztett réteg felületén előhívott diszlokációkat mutatja. Jól láthatók itt is az azonos csúszósíkban fekvő diszlokációk felületen előhívott végei.

Különösen a 3. ábrán, a 2. ábra kinagyított részletén szembetűnő, hogy a maratási tetraéderek $\{1\bar{1}1\}$ síkjai párhuzamosak az $(1\bar{1}1)$ csúszási síkkal, amelyekben a diszlokációk felhalmozódtak. Növesztés során sok ilyen diszlokációsor keletkezik. Ezek a növesztett rétegben is folytatódnak, és természetesen a réteg lemaratása után is megmaradnak az alapkristályban.

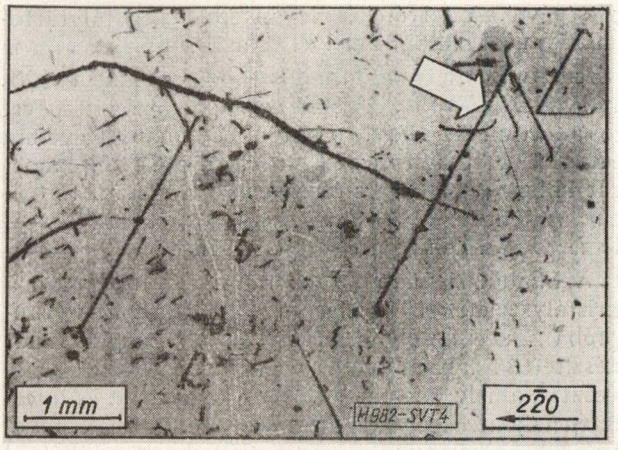
Az azonos csúszósíkban feltorlódott diszlokációk jellegzetes képének megjelenése az alacsony hibakoncentrációjú kristályokból készített szeletek tulajdonsága. Ez a tulajdonság a vékonyrétegű, az egyik felületre teljes egészében kiterjedő homoepitaxiális növesztés során is megmarad és a rácshibakoncentráció növekedés egyik fő forrása. A mechanizmus egyenlő mértékben növeli a rácshibasűrűséget az alap- és a növesztett kristályban. Tapasztalatunk szerint a diszlokációforrásokat működtető feszültségtér létrehozásához bizonyos vastagságú növesztett réteg is szükséges, mivel a növesztés nélküli hőkezelés és a 10 μm-es növesztés esetén jelentéktelen, 30 μm növesztés esetén pedig jelentős változást tapasztaltunk a feltorlódott diszlokációkban. Elrendeződésük a térfogat mentén inhomogén.

Rétegeződési hibák

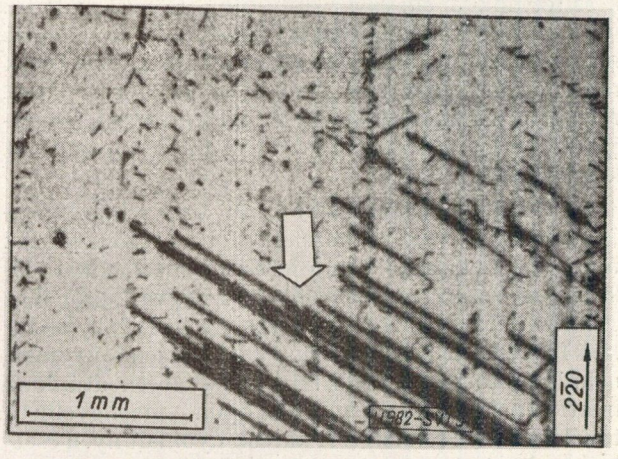
A szelektív marással előhívható háromszög alakú rétegződési hibák mellett megfigyelhettünk néhány mm hosszúságban kiterjedő rétegződési hibákat is (4. ábra), sőt ezek jelentősen be is sűrűsödhettek egyes tartományokban (5. ábra). E rétegződési hibák parciális diszlokciókkal vannak lezárva az alapkristály felé. Ilyen hibákat csak a növesztett réteg $\{111\}$ típusú síkjaiban figyeltünk meg, a növesztés (111) síkjában azonban nem. Ezek a hibák csak a növesztett rétegben képződtek, és a maratás során eltávolíthatók voltak. A hibák topográfiás képei szigorúan egyenesek és csak 60°-os szöget zárnak be egymással. Rétegződési hibák keletkezése esetén mindig megfigyeltünk feltorlódott diszlokációkat is, sőt az egész kristályt nem egyenletesen meggörbítő, távolható feszültségteret is (ez utóbbit a topográfiás felvétel kontrasztkülönbsége mutatta).

Az alapkristály felületi deformációiból eredő hibák

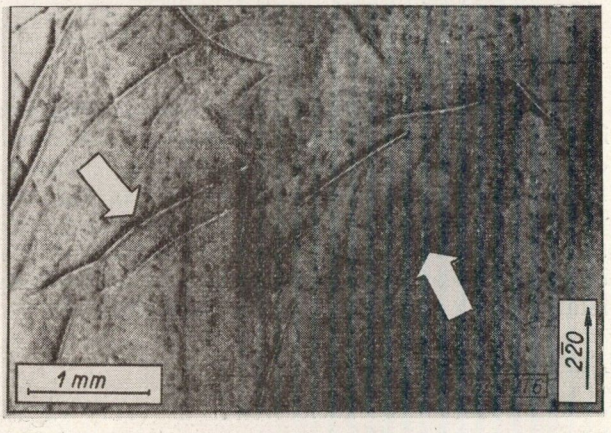
Az alapkristály felülete alatt visszamaradó deformációs nyomok — ha a kristály előkészítése nem volt megfelelő — az epitaxiális növesztés után is megtalálhatók. Ezt mutatja a 6. ábra, amelyen még kis kiterjedésű, pontszerű hibák is vannak. Még „durvább" hibákat mutat a 7. ábra. Ez a kristály megmunkálás után olyan sok felületi deformációt tartalmazott (7*a* ábra), hogy a kristály ennek hatására meg is görbült, így a felvétel készítése közben csak egyes részei maradtak reflexiós helyzetben. Növesztés közben, feltehetően a magasabb hőmérséklet hatására ez a feszültségtér kilágyul (7*b* ábra), és a hibás szerkezet lényegében nem változik. Csak a felsőbb rétegek hibái maródnak le a növesztés előtt, míg a mélyebben fekvő deformációk inkább előhívódnak a növesztés során. Az ilyen növesztés átmeneti rétegében igen sok a hiba. Bár a topogram a teljes térfogatot mutatja, a réteg szerkezetét nehéz külön



4. ábra. Si epitaxiális rétegben képződött rétegeződési hiba képe Lang-felvételen



5. ábra. Sok rétegződési hiba epitaxiálisan növesztett Si-egykristályrétegben. Lang-felvétel

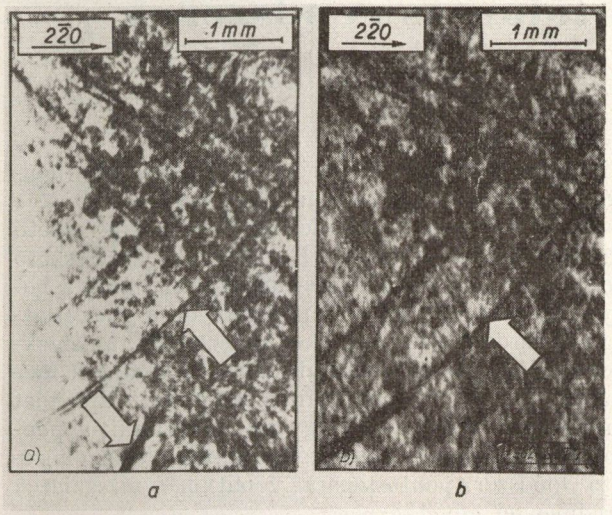


6. ábra. Lang-felvétel deformációs nyomokról epitaxiálisan növesztett Si egykristályban

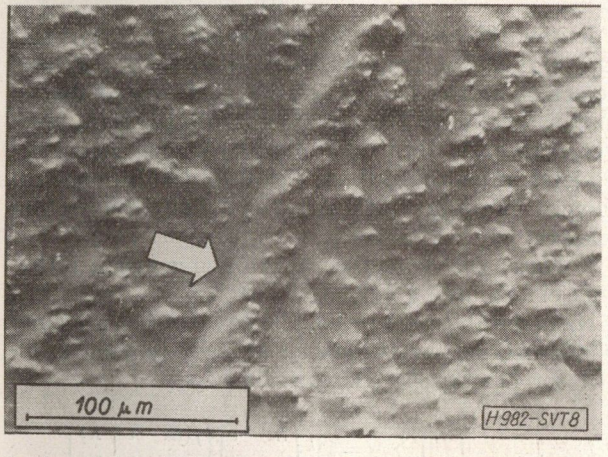
megfigyelni, mert az átmeneti réteg hibái elkenik azt. A 8. ábra interferenciakontraszt-mikroszkóp felvétele azonban — az egyenlőtlen felület miatt — hibásabb rétegre enged következtetni. A felületi deformációs nyomok is előhívódnak az új felületen, ezeket szelektív marással is láthatóvá lehet tenni, és a topográfiás felvétel is mutatja azokat.

Az előbbi hibákon kívül a kristályszeleten mikroszkóp nélkül is észrevehető néhány hiba is keletkezik,

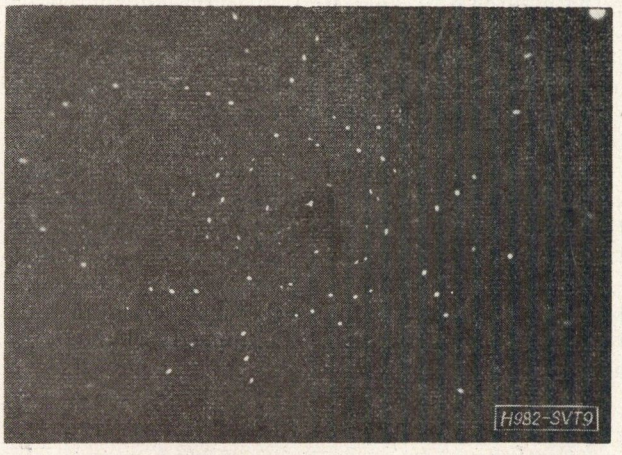
bár a felület egyébként sima és tükrös. A nagyobb hibás helyek vizsgálata kimutatta, hogy itt néhány kis, 10—20 μm szemcseméretű újabb kristály vagy ikerkristály keletkezik, amelyek az alapkristálytól nagyon eltérő orientációt mutatnak. Ilyen kristályrészről készült a 9. ábra Laue-felvétele, amelyen a nagyobb méretű, az alapkristályról származó reflexiók mellett a tükörpozícióban is megtalálhatók a kisebb kristálytartományról (tripiramis) származó gyengébb és feltöredezett reflexiók. Ezenkívül kitüntetett orientáció nélkül is kialakult kristályrész, amelyet az aszimmetrikusan elhelyezkedő kisméretű reflexiós foltok jeleznek.



7. *ábra.* Optikailag hibátlan felület alatt visszamaradó deformációs nyomok Si egykristályról készült Lang-felvételen, *a)* homoepitaxiális növesztés előtt, *b)* növesztés után



8. *ábra.* Deformációs nyomokat tartalmazó Si szeletre növesztett epitaxiális réteg felülete interferenciakontrasztmikroszkópon



9. *ábra.* Elsőreflexiós Laue-felvétel tripiramis környékéről

IRODALOM

1. *Booker, G. R.:* JAP. 37. 441. 1966.
2. *Kürthi J.—Stefániay V.:* Híradástechnika (megj. alatt).
3. *Lang, A. R.:* Acta Cryst. 12, 249. 1959.
4. *Mendelson, S.:* Single Crystal Films (ed. M. H. Francombe —H. Sato) Pergamon Press, 1964.
5. *Mendelson, S.:* JAP. 36, 1315. 1965.
6. *Schwuttke, G. H.:* Final Report — AFCRL—64—542 GTEL. Bayside, New York, 1964.
7. *Szántó I.:* MFI közl. R—1. 1968.
8. *Székely T.-né:* MFI közl. R—3. 1968.
9. *Székely T.—Varga L.—Tornay I.:* MFI Jubileumi előadássorozat (megjelenés alatt), 1969.
10. *Varga L.:* MFI Jubileumi előadássorozat (megjelenés alatt), 1969.

GOSZTONY GÉZA
Beloiannisz Híradástechnikai Gyár

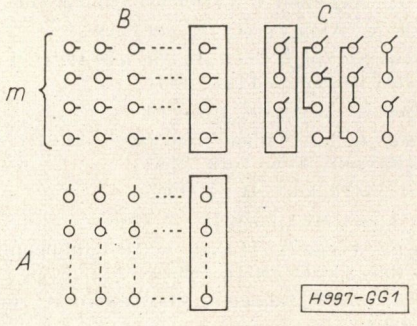
Többszörösen bekötött kimeneteket tartalmazó csatolóutas rendszerek méretezése

ETO 621.3.062.001.24

A csatolóutas irányválasztó rendszerek kimenetén általában a kevés vonalat tartalmazó nyalábokat szokták úgy elrendezni, hogy egy-egy vonalat több kimeneti pontra is bekötnek. Az ilyen többszörösen bekötött (multiplikált) vonalú irányok esetében a torlódás meghatározásához a Jacobaeus-féle számítási módszert csak módosított formában lehet alkalmazni. Az 1. ábrán felrajzolt elrendezés és az egyszeresen bekötött vonalú irányokat tartalmazó elrendezések között az a különbség, hogy a B mezőben található szabad elemek számából az irány még elérhető vonalainak száma nem adódik egyszerűen. Az előbbi esetben függetlenül attól, hogy az alapvető torlódási képletben

$$E=\sum_{p=0}^{m} G(p)\, H(m-p),$$

az egyedi elemek vagy az elemsorok foglaltságát adták-e meg a $G(p)$, illetve $H(m-p)$ függvények, p foglalt elem/sor esetében a másik fokozatban $(m-p)$ elem/sor maradt elérhető. Ezek foglaltságára volt szükség torlódás létrejöttéhez. Az 1. ábrából látható,



1. ábra. Csatolóutas rendszer többszörösen bekötött kimenetekkel

hogy pl. ha a B mező bekeretezett oszlopában a két felső elem foglalt, akkor a C mező bekeretezett irányában az alsó elem kell foglalt legyen torlódás kialakulásához. De ha a középső két elem foglalt B-ben, akkor C-nek mindkét eleme elérhető marad. Ezért bár $p=2$ mindkét esetben az elsőhöz $H(1)$, a másodikhoz $H(2)$ tartozik.

A feladat az, hogy a B oszlop szabadon maradó elemei és a C irányban elérhető vonalak száma közötti összefüggést megállapítsuk, figyelembe véve az elrendezést. Az alapképletben az elrendezéstől való függőséget a következőképpen lehet jelölni:

$$E=\sum_{p=0}^{m} G(p)\, H[j(m-p)]$$

Beérkezett: 1969. XII. 8.

Vizsgálatunk végső eredménye a $H[j(m-p)]$ függvény tényleges alakjának meghatározása.

Az alábbiakban az elméletileg pontosan kezelhető elrendezésekhez a szabad B elemek és az elérhető vonalak közötti összefüggést adjuk meg, majd a bonyolult, pontosan nem számítható, de a gyakorlatban előforduló elrendezéseket ismertetjük, amelyekhez általánosan alkalmazható közelítő módszert mutatunk be. A továbbiakban a torlódási alapképlet módosított $H[j(m-p)]$ függvényt tárgyaljuk a pontos, illetve a közelítő számítás esetében. Végül a közelítő módszer pontosságára vonatkozó vizsgálatok eredményei következnek.

1. Jensen képlete többszörösen bekötött kimenetek esetén

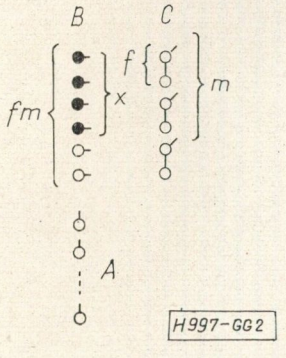
Jensen 1952-ben megjelent munkájában [1] megadja a B oszlop szabad elemei és az irány elérhető elemeinek száma közötti összefüggést arra az esetre, amikor a bekötési tényező egész szám (2. ábra, amelyen csak az 1. ábra bekeretezett részének megfelelő részletet rajzoltuk ki). A bekötési (multiplikációs) tényező megadja, hogy egy vonal hány helyre van bekötve, jele a 2. ábrán f.

A Jensen-féle képlethez nagyon egyszerűen juthatunk el az alábbi gondolatmenettel.

Ha m darab f tagú sorból álló együttesben x elemet véletlenszerűen helyezünk el, akkor i teljesen kitöltött sor keletkezésének valószínűsége:

$$Q(i|x)=\frac{\binom{m}{i}\sum_{k=0}^{m-i}(-1)^k\binom{m-i}{k}\binom{f(m-i-k)}{x-f(i+k)}}{\binom{mf}{x}} \qquad (1)$$

$Q(i|x)$ a feltételes sorfoglaltsági valószínűség, levezetését lásd pl. [2]-ben.



2. ábra. A csatolóelemek száma fm, ezek közül foglalt x, bekötési tényező f, az irány vonalainak száma m

A 2. ábrán látható rendszer B oszlopa felfogható m darab f tagú sorból álló együttesnek, az f tagú sorokat a C oszlopban f helyre bekötött elemeknek megfelelően kell kijelölni. Ha tehát az m darab vonalat fm elemen át kell elérnünk és ezek közül x elem nem használható fel (foglalt!), akkor a $Q(i|x)$ annak valószínűségét adja meg, hogy az f tagú együttesek közül i darab csak a nem felhasználható elemekkel érhető el. Ez más szavakkal azt jelenti, hogy a többi $(fm-x)$ elemen át csak a maradék $(m-i)$ vonalhoz juthatunk el. A nem használható x elem „lezárja" az i darab f helyre bekötött vonalat.

A $Q(i|x)$ kifejezést átírhatjuk olyan formára, hogy abban a felhasználható elemek (azaz: $fm-x$) és a még elérhető f tagú elemek száma (azaz: $m-i$) szerepeljen:

$$Q(i|x)=Q(m-i|fm-x)=$$

$$=\frac{\binom{m}{m-i}\sum_{k=0}^{m-i}(-1)^k\binom{m-i}{k}\binom{f(m-i-k)}{x-f(i+k)}}{\binom{fm}{mf-x}}=$$

$$=T(j|s)=\frac{\binom{m}{j}\sum_{k=0}^{j}(-1)^k\binom{j}{k}\binom{f(j-k)}{s}}{\binom{fm}{s}} \qquad (2)$$

A $T(j|s)$ feltételes valószínűségben tehát j jelenti a még elérhető vonalak (f tagú együttesek) számát, és s jelenti a felhasználható (tehát nem foglalt) elemeket az fm darab elem közül.

Megjegyezzük, hogy tényleges számításokhoz az összegezési határok az alábbiak:

$$T(j|s)=\frac{\binom{m}{j}\sum_{k=0}^{\mathrm{ent}(j-sf)}(-1)^k\binom{j}{k}\binom{f(j-k)}{s}}{\binom{fm}{s}} \qquad (2a)$$

ha ugyanis $k>\mathrm{ent}(j-s/f)$, akkor eredményül zérus tagokat kapunk.

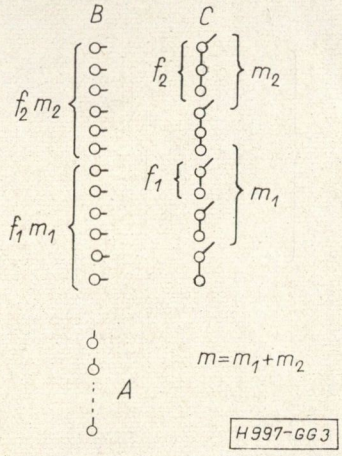
2. Jensen képletének általánosítása tetszőleges bekötési tényező esetén

Amennyiben a 2. ábrán látható elrendezés helyett a 3. ábra szerint vannak a többszörösen bekötött vonalak elrendezve, akkor a $T(j_1, j_2|s_1, s_2)$ feltételes valószínűség jellemzi a viszonyokat. Megadja annak valószínűségét, hogy ha az f_1m_1 elem közül még s_1, az f_2m_2 elem közül még s_2 használható fel, akkor az m_1 (f_1 tagú) elemből j_1-et, az m_2 (f_2 tagú) elemből j_2-t lehet elérni.

A kiindulási feltevés szerint az (s_1+s_2) felhasználható elem véletlenszerűen helyezkedik el a rendelkezésre álló $(f_1m_1+f_2m_2)$ helyen, az egyes térrészekben az elhelyezkedések függetlenek. Ezért

$$T(j_1, j_2|s_1, s_2)=T(j_1|s_1)\,T(j_2|s_2) \qquad (3)$$

Az $(f_1m_1+f_2m_2)$ elemek foglaltságáról általában csak annyit tudunk, hogy összesen s használható még fel, továbbá végső soron csak az érdekel, hogy összesen j elemet lehet elérni, ezért ebben az esetben is a $T(j|s)$ valószínűségre van szükségünk.



3. ábra. Irány többféle bekötési tényezővel

A két térrész között az $s=s_1+s_2$ elem a hipergeometrikus eloszlás szerint oszlik el és ezért

$$T(j_1, j_2|s)=\sum_r T(j_1, j_2|s-r, r)\frac{\binom{f_1m_1}{s-r}\binom{f_2m_2}{r}}{\binom{f_1m_1+f_2m_2}{s}},$$

ahol s_1 helyett $(s-r)$-t, s_2 helyett r-t írtunk.

Továbbá

$$T(j|s)=\sum_q T(j-q, q|s)$$

tehát

$$T(j|s)=\sum_{q=0}^{j}\sum_{r=0}^{s}T(j-q|s-r)\,T(q|r)\frac{\binom{f_1m_1}{s-r}\binom{f_2m_2}{r}}{\binom{f_1m_1+f_2m_2}{s}}$$

Részletesen kiírva az alábbi végeredményt kaptuk, a kínálkozó egyszerűsítést a szemléletesség érdekében még nem végeztük el.

$$T(j|s)\sum_{q=q_0}^{q_1}\sum_{r=r_0}^{r_1}\frac{\binom{m_1}{j-q}\sum_{k=0}^{k_1}(-1)^k\binom{j-q}{k}\binom{f_1(j-q-k)}{s-r}}{\binom{m_1f_1}{s-r}}\cdot$$

$$\cdot\frac{\binom{m_2}{q}\sum_{t=0}^{t_1}(-1)^t\binom{q}{t}\binom{f_2(q-t)}{r}}{\binom{m_2f_2}{r}}\cdot\frac{\binom{f_1m_1}{s-r}\binom{f_2m_2}{r}}{\binom{f_1m_1+f_2m_2}{s}} \qquad (4)$$

Ahol:

$$k_1=\mathrm{entier}\left(j-q-\frac{s-r}{f_1}\right)$$

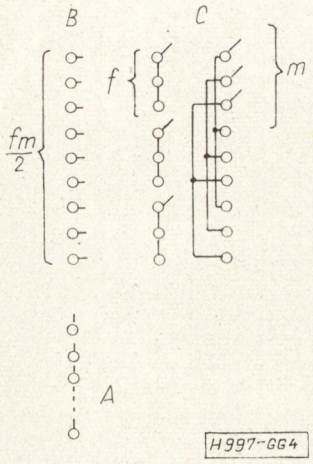
$$t_1=\mathrm{entier}\left(q-\frac{r}{f_2}\right)$$

$r_0=\sup\quad(q;\ s-f_1(j-q)$

$r_1=\inf\quad(q_2f_2;\ s-(j-q)$

$q_0=\sup\quad(0;\ j-m_1)$

$q_1=\inf\quad(j;\ m_2)$



4. ábra. Az irány vonalai több oszlopban helyezkednek el

A feltüntetett összegezési határok a tényleges számítás során jelentenek megtakarítást, az elhagyott tagok összege zérust eredményez.

A gyakorlatban a 3. ábrán láthatónál bonyolultabb egyoszlopos elrendezés nem fordul elő akkor, ha a szabad út keresés véletlenszerű. Véletlenszerű kereséshez ugyanis az egyenletes elrendezés a legelőnyösebb és tetszőleges számú m kimenet bármilyen számú K m bekötési pontra beköthető úgy, hogy legfeljebb kétféle bekötési tényező adódjék és ezek egységgel különbözzenek. Maga a számítási módszer teljesen hasonló gondolatmenettel tetszőleges számú bekötési tényező esetére is általánosítható, de nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a Jacobeaus-módszer csak véletlenszerű kereséshez alkalmazható.

A (4) összefüggés kézi számításhoz fáradtságos, azonban számítógéppel könnyen kezelhető.

3. Pontos képlettel le nem írható elrendezések

A 3. ábrán látható elrendezésnél bonyolultabb esetekkel is találkozhatunk a gyakorlatban (4. ábra). A $T(j|s)$ függvény több multiplikált oszlop esetében bonyolult, minden szerkezetre külön meg kell határozni. Az egyes oszlopokban elérhető többszörös elemek száma ugyanis nem független egymástól, hanem a rögzített elrendezés függvénye.

Tudomásunk szerint ez ideig még nem sikerült meghatározni a $T(j|s)$ függvény ilyen esetekhez alkalmazható általános alakját.

Valószínű, hogy ezekben az esetekben $T(j|s)$ alakja az eddigieknél bonyolultabb. A számítás megkönnyítése érdekében indokolt közelítő megoldást kidolgozni.

4. Átlagos elérhetőség meghatározása többszörösen bekötött vonalcsoportok esetén

A közelítő módszer alapelve az, hogy az előző fokozatban még felhasználható s darab elemhez átlagosan elérhető vonalszámot rendel az s darab elem elhelyezésétől függő tényleges vonalszámok és ezek valószínűsége helyett.

Kiindulásként meghatározzuk, hogy egyetlen f helyre bekötött vonal mennyivel járul hozzá az átlagos elérhetőséghez. Az 5. ábrán csak az első fokozatot és az f helyre bekötött vonalat tüntettük fel. Az elrendezés többi része nem játszik szerepet meggondolásunkban.

Ha $(s-k)$ elem kerül a kijelölt f helyre, akkor ennek az eseménynek a valószínűsége

$$\frac{\binom{f}{s-k}\binom{m-f}{k}}{\binom{m}{s}}$$

Az átlagos elérhetőséghez a $k=s$ esemény kivételével mindegyik hozzájárul, az események valószínűsége a súlyozási tényezőket szolgáltatja. Az átlagos elérhetőséget $\bar{j}_1(s)$-el jelöljük, s a felhasználható elemek számát adja meg, az 1 arra utal, hogy csak egyetlen vonalat vettük figyelembe.

$$\bar{j}_1(s)=\sum_{v=0}^{s-1}\frac{\binom{f}{s-v}\binom{m-f}{v}}{\binom{m}{s}}=1-\frac{\binom{m-f}{s}}{\binom{m}{s}} \tag{5}$$

Ha nem egyetlen, hanem pl. m_1 darab f-szeresen bekötött vonal van, akkor

$$\bar{j}(s)=\bar{j}_1(s)\,m_1=m_1-\frac{\binom{m-f}{s}}{\binom{m}{s}}\,m_1 \tag{5a}$$

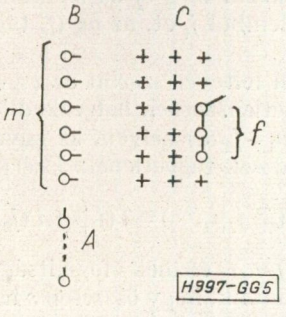
Végül, ha többféle bekötési tényező is előfordul, akkor

$$\bar{j}(s)=\sum_{i=1}^{g}1-\frac{\binom{m-f_i}{s}}{\binom{m}{s}}\,m_i \tag{6}$$

Ahol m_i darab vonal van f_i-szeresen bekötve.

5. Módosított torlódási alapképlet

Eddigi vizsgálataink arra irányultak, hogy az első fokozatból felhasználható elemek (elemsorok) és a második fokozatban elérhető többszörösen bekötött vonalak száma között összefüggést állapítsunk meg. Egyszerűbb esetekben az összefüggést elméletileg pontos formában lehet meghatározni (pl.: $T(s\,j)$ a (2) és (4) képletben). Bonyolult elrendezésekhez explicit



5. ábra

képletet általában nem lehet megadni, azonban az átlagos elérhetőség ezekhez is kiszámítható ($\bar{j}$ az (5) képletben).

Az alapképletben szereplő $H\,j(m-p)$ függvény a $H\,\bar{j}(m-p)$ alakot veszi fel akkor, ha az átlagos elérhetőséget alkalmazzuk. A gyakorlatban $(m-p)$ minden értékéhez ki kell számítani $\bar{j}(m-p)$-t [az $(m-p)$ szomszédos értékeihez tartozhat azonos átlagos elérhetőség]. Mivel a H függvényt csak egész értékű argumentumokra értelmeztük $\bar{j}(m-p)$-t egész értékűre kell kerekíteni. Az alapképlet tehát így alakul:

$$E=\sum_{m=0}^{p} G(p)\,H\,\bar{j}(m-p) \qquad (6a)$$

és azt jelenti, hogy ha az első fokozatban p foglalt elem van, akkor a torlódás létrejöttéhez a kimeneti vonalak közül átlagosan bizonyos $\bar{j}(m-p)$ darabnak kell foglaltnak lenni.

Ha a Jacobaeus-féle alapképletben a $T(j|s)$ összefüggést alkalmazzuk, akkor figyelembe kell venni, hogy az $s=m-p$ darab még felhasználható első fokozatbeli elemhez nem egyetlen j érték tartozik. A pontos számításhoz az összes j értéket végig kell járni minden lehetőséget megvalósulásának valószínűségével figyelembe véve.

Az alapképlet emiatt így alakul:

$$E=\sum_{p=0}^{m} G(p)\sum_{j=0}^{N} T(j|m-p)\,H(j) \qquad (7)$$

ahol N jelöli a vonalak számát (amely a többszörös bekötés miatt nem kell, hogy m-mel bármilyen összefüggésben legyen).

6. A közelítő módszer ellenőrzése

A közelítő módszer hibája két forrásból eredhet. Egyrészt minden átlagolási eljárás kiküszöböli a torlódás szempontjából különösen kedvező vagy kedvezőtlen eseteket. Ez végeredményben oda vezet, hogy az átlagolással megállapított torlódás kisebb a ténylegesnél. Másrészt a $\bar{j}$ érték meghatározásánál előírt kerekítés hatása előre nem állapítható meg, okozhat látszólagos torlódás növekedést, vagy csökkenést egyaránt. A vizsgálatok azt mutatják, hogy a szokásostól eltérő, a kedvezőtlen irányba mutató kerekítési módszert nem kell alkalmazni.

Az ellenőrzést egy, illetve két C oszlopot tartalmazó elrendezésekre végeztük el. Az egyoszlopos pontos képlettel is számítható elrendezések esetében számítógéppel 168 összehasonlító számítást végeztünk. A kétoszlopos elrendezések esetében a közelítést utánzással kapott eredménnyel vetettük össze.

6.1 *Egyoszlopos elrendezések*

Az alkalmazott jelölést a 6. ábra mutatja. b, c a csatolóelemek, ill. az irány vonalainak forgalmát jelentik. A vizsgálat során a forgalmak az alábbi értékeket vették fel:

$b = 0{,}2 \quad 0{,}5 \quad 0{,}8$ erl

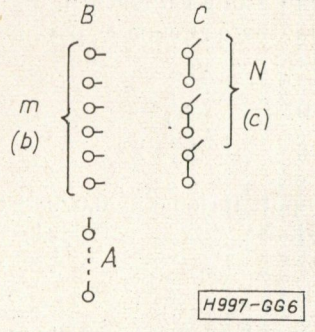
$c = 0{,}2 \quad 0{,}3 \quad 0{,}4 \quad 0{,}5 \quad 0{,}6 \quad 0{,}7 \quad 0{,}8$ erl

A 6. ábrán látható többi paraméter értékei az alábbiak voltak:

$m=12$

N	6	4	3	2
f	2	3	4	6

A B oszlopban Bernoulli-eloszlást tételeztünk fel, a C oszlopban (pontosabban az N darab vonalon) Bernoulli-, illetve Erlang-eloszlást alkalmaztunk. Az összehasonlító számítások eredményét az 1. táblázat tartalmazza. A Bernoulli-, ill. Erlang-eloszlást feltételező esetek között a közelítési hiba szempontjából nem volt lényeges eltérés, ezért az eredményeket összefoglalva adtuk meg. Külön rovat tartalmazza azokat az eseteket, amikor a pontos torlódási érték 0,005—0,05 között volt.



6. ábra. Egyoszlopos irány, egyfajta bekötési tényezővel

Látható, hogy a közelítő módszer hibája az esetek 88,1%-ában kisebb, mint 10%. A Jacobaeus-eljárás alkalmazási tartományában ez azonban csak az esetek 74,9%-ára érvényes. Ennek az az oka, hogy a közelítés nagy torlódás esetében jobb, mint a 0,005—0,05 között.

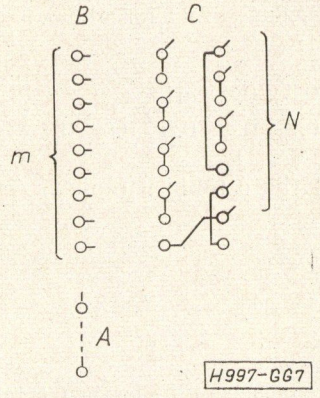
1. táblázat

A közelítő módszerrel számított torlódási értékek megoszlása hibaszázalék szerint

Eltérés a pontos értékhez viszonyítva (%)		+ 0—1	− 0—1	− 1—2,5	− 2,5—5	− 5—10	− 10—15	− 15—20	− 20
Megoszlás (%)	Teljes vizsgálat	3	28	19,6	23,2	17,3	7,7	3,0	1,2
	$E=0{,}005$—$0{,}05$ tartomány	—	8,3	16,6	25,0	25,0	12,5	4,2	8,3

6.2 Több oszlopos elrendezések

Az elrendezések szerkezete a 7. ábrán látható. A *B* oszlopban és a kimeneteken egyaránt Bernoulli-eloszlást tételeztünk fel. Az utánzásos vizsgálatokat a TELMOD elektronikus modellező berendezéssel végeztük [3].



7. *ábra.* Kétoszlopos irány, egyfajta bekötési tényezővel

A mért és számított torlódási értékek a 2. táblázatban láthatóak. A mért értékek feltüntetett hibája 95%-os konfidencia intervallumra vonatkozik. A vizsgálat során $m=9$ minden esetben.

A 8. ábrán látható elrendezés paraméterei a következők voltak:

$m=10$ $N_1=4$ $f_1=3$

$N=6$ $N_2=2$ $f_2=4$

utánzással kapott torlódás: 0,0298±0,0015
számított torlódás: 0,0324

2. táblázat

Utánzással megállapított és számított torlódási értékek összehasonlítása

$f=2$	$N=9$
utánzás	számítás
0,219 ±0,011	0,227
0,0845 ±0,0042	0,084
0,0224 ±0,0011	0,0225
0,0136 ±0,0007	0,0133
$f=3$	$N=6$
0,116 ±0,0058	0,111
0,0386 ±0,0019	0,0358
0,0099 ±0,0005	0,0085
$f=6$	$N=3$
0,23 ±0,0115	0,225
0,137 ±0,007	0,130
0,0696 ±0,0035	0,0676
0,0313 ±0,0015	0,0305
0,011 ±0,00055	0,0105
$f=9$	$N=2$
0,0485 ±0,0024	0,0480

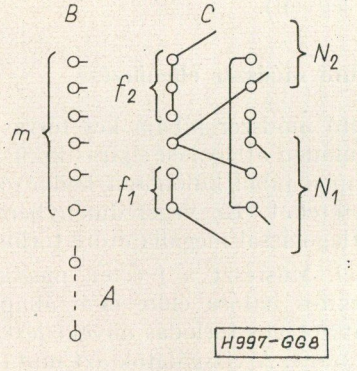
Az utánzással kapott és a közelítő módszerrel számított értékek közötti eltérés több oszlopos elrendezések esetében is csak ritkán haladja meg a 10%-ot. A számított érték éppen közelítő jellege miatt esetenként kívülesik a konfidencia intervallumon.

Az ellenőrzés alapján megállapítható, hogy a közelítő módszert biztonságosan lehet többszörösen bekötött kimenetű rendszerek számításához alkalmazni. A közelítés az esetek többségében a ténylegesnél kisebb veszteség értékeket szolgáltat ugyan, de az eltérés nagysága szinte soha nem haladja meg a gyakorlatban igényelt pontosság mértékét.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy többszörösen bekötött kimeneti vonalakat tartalmazó csatolóutas irányválasztó kapcsolásokat csak egyszerű elrendezés esetében lehet pontosan méretezni a Jacobaeus-módszer alapján. Ha többféle bekötési tényező van, akkor a számítási képletek bonyolultak, illetve nem ismeretesek. Az ismertetett közelítő eljárás minden esetben alkalmazható, a számításhoz nincs szükség számítógépre. Összehasonlító vizsgálatok alapján kimutatható, hogy a közelítő módszer hibája a pontos értékhez képest az esetek zömében kisebb, mint 10%. Indokolt tehát, ha az $E=0{,}01$ körüli torlódás tartományában, vagyis ott, ahol a Jacobaeus alapmódszer hibája kicsi, a közelítő számítási eljárást használjuk.

A számítási módszert a BHG CA 1002 típusú crossbar alközpontjának méretezéséhez dolgoztuk ki.

Végül köszönetem fejezem ki Rét Andrásnénak (BHG) a kézirat átnézéséért és az eljárás alkalmazása



8. *ábra.* Kétoszlopos irány, kétfajta bekötési tényezővel

során nyújtott értékes segítségéért, továbbá Endrődi Tamásnak (AKI) és Edöcsény Lászlónak (BHG) az összehasonlító számítások és mérések gondos elvégzéséért.

IRODALOM

1. *Jensen, A.:* A basis for calculations of loss in crossbar automatic exchanges (dánul); Teleteknik, 3. 1952, 3. p. 123—148.
2. *Gosztony G.:* Torlódás meghatározása elemsorokat tartalmazó csatolóutas elrendezésekben; Híradástechnika, 17. 1966. 2. p. 45—51.
3. *Gosztony G.—Endrődy T.:* TELMOD — a simulating equipment for the loss-analysis of switching networks; Budavox Telecommunication Review 1968. 3—4. p. 1—21.

S. TÓTH FERENC
Gépipari Elektromos Karbantartó Vállalat

Sztereofónia

ETO 534.76 : 621.376.3 : 621.396.62

Sztereohangtechnika vagy sztereofónia gyűjtőnévvel jelöljük azokat a módszereket, amelyek segítségével hangvisszaadáskor a megfigyelő információt kap a hangforrás térbeli elhelyezkedéséről, esetleges mozgásáról.

1. A térhallás rövid ismertetése

A sztereohangátvitel megvalósítására két vagy több, elvileg egyenértékű csatornát tartalmazó átviteli láncot alkalmazunk.

Hallószervünk segítségével képesek vagyunk egy bizonyos hangforrás irányát, távolságát és körülbelüli méreteit meghatározni. Ezt a jelenséget irányhallásnak nevezzük.

A két fül közötti távolság következtében a füleket érő hanghullámoknak az iránytól függő késésük, fáziskülönbségük van. A füleket rövid időn belül érő hanginformációk közül az előbb érkező a döntő az iránymeghatározás szempontjából.

Állandóan változó hangképek esetén, ha a két információ között 250 μs-nál nagyobb az időkülönbség, abban az esetben a második hangforrás irányát akkor sem észleljük, ha annak intenzitása az elsőénél nagyobb, de egy bizonyos küszöbérték alatt marad. A második hangforrás intenzitása az elsőét 8 dB-nél többel nem haladhatja meg. 40 ms-nál nagyobb időkülönbség esetén a két hangforrást külön-külön, illetve mint visszhangot halljuk. Állandósult hangjelenségek pl. szinuszos hangok esetén az időkülönbség kisebb jelentőségű, mint meredek felfutású hangimpulzusok esetében. Ezt a jelenséget Haas-effektusnak nevezzük.

A fej árnyékoló hatása következtében a hangforrás irányával ellentétes oldalon levő fül kisebb intenzitású hangot kap.

A fenti jelenségek mindegyike függ az akusztikus jel frekvenciájától és a hangosság mérőszámától. Ezek a megfigyelések rávilágítanak a sztereofónia azon hiányosságára, hogy a futásidő- és intenzitáskülönbségek kiegyenlítése, amely mind a felvétel, mind a visszahallgatás során igen fontos, sohasem lehet teljes értékű, mert a kiegyenlítések csak bizonyos szinten és frekvencián érvényesülnek. Ez az egyik korlátozó tényezője annak, hogy a hallgató a szoba teljes területén sztereohatást kapjon.

Ahhoz, hogy a hanginformáció a hangtérben való tényleges jelenlét érzetét keltse, olyan tökéletes akusztikus-villamos jelátalakítás és jelátvitel szükséges, amely a fentebbi összes objektív és járulékos szubjektív tényezőket a felvételi oldalról a lehallgatás oldalára teljes hűséggel leképezi.

A fentiekből következik, hogy a csatornák átviteli tényezőinek szigorú követelményeket kell kielégíteniük. A csatornák futási ideje közötti 1 kHz-en legfeljebb 0,1—0,2 ms különbséget engedhetünk meg, a két csatorna között a teljes frekvenciasávban minimálisan 25 dB áthallási csillapítást kell megkövetelnünk.

Összegezve az eddigieket megállapíthatjuk, hogy a külső hangképek iránymeghatározásához legalább két ún. oldalinformációs jel átvitelére van szükség. A térhatás, illetve a fiktív hangforrás tehát két egyszerűsített információ egybevetéséből keletkezik.

2. A nagyfrekvenciás sztereofónia

2.1. *Sztereoadástechnika*

A hangfrekvenciás sztereofónia elterjedésével felmerült az igény egy új szolgáltatás, a nagyfrekvenciás sztereofónia iránt.

Számos javaslatot tettek közzé, de mivel a rádióhallgatók sztereofónia utáni igénye az élethű hangátvitel (Hi-Fi) megvalósítása után jelentkezett, így logikus, hogy a fejlődés folyamán az URH-sávban működő FM rendszerek kerültek előtérbe.

A kísérletezések alapvető célja az volt, hogy a jobb (J) és a bal (B) oldalinformációs jelek összegéből nyert $J+B$ jelet a kompatibilitás szempontjából teljesértékű monofonikus jelnek lehessen tekinteni. Olyan moduláló eljárást kellett találni, ahol a $J+B$ és a $J—B$ jelekkel egyidejűleg moduláljuk az adót, és monovevőben a $J+B$ jel minden átalakítás nélkül tökéletes monoműsort, a sztereovevőben pedig a $J+B$ és a $J—B$ jelek — megfelelő átalakítás után — külön a J és külön a B jelet szolgáltassák.

A kompatibilitás igénye a következő megkötéseket vonja maga után:

a) Az átvitel minősége szempontjából ragaszkodni kell a monoátvitel során kialakult sávszélesség betartásához (50—15 000 Hz, ±1,5 dB).

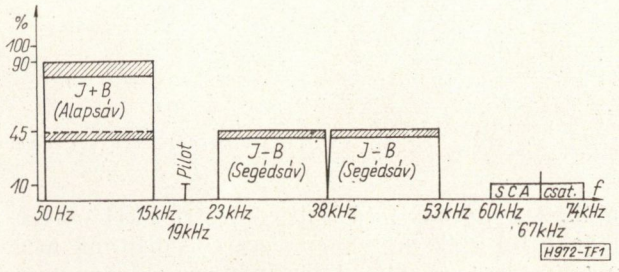
b) A $J+B$ összegjellel mint kompatibilis monojellel az URH-adót az eddigieknek megfelelő módon, 50 μs-os előkiemeléssel kell frekvenciamodulálni.

Ezek után az volt a kérdés, hogy a $J—B$ segédjellel miképpen modulálják ugyanazt az adót úgy, hogy az a kompatibilitás abszolút feltételének eleget tegyen, ne veszélyeztesse a besugárzott terület nagyságát, a jel—zaj viszony lényegesen ne csökkenjen, és a dekódolás viszonylag olcsó áramkörökkel legyen elvégezhető.

Amerikában a távközlési főigazgatóság, az FCC (Federal Communication Commission) 1961. április 20-án hozott határozatában az USA számára előírta a kötelező nagyfrekvenciás sztereofonikus adásrendszert.

Mivel a Magyar Rádió és Televízió, valamint a Magyar Posta mint műsorszolgáltató szervek az FCC előírásaival nagymértékben megegyező európai nagy-

Beérkezett: 1969. június 11.



1. ábra

frekvenciás sztereoszabvány szerint végeznek kísérleteket, így célszerű az eredeti tervezet ismertetése.

A rendszer, amely a General Electric Company és a Zenith Radio Corporation társaságok javaslatainak egybevetéséből született, a következő:

Az 1. ábrán függőlegesen a maximális megengedett löket (±75 kHz) kihasznált százalékát, vízszintesen a frekvenciát tüntettük fel.

A kompatibilis alapsávi ($J+B$) összegjel a monoüzemben kialakult jellemzők betartásával frekvenciamodulálja az adót, mégpedig a maximális löket 90%-ig monoüzemben, 45%-ig sztereoüzemben.

A sztereoinformációt hordozó segédsávi ($J—B$) különbségjellel ugyancsak 50—15 000 Hz sávszélességgel előbb egy 38 kHz-es segédvivőt amplitúdómodulálnak, AM-DSB/SC rendszer szerint. A keletkezett kétoldalsávos, elnyomott vivőjű jellel az adó vivőjét 45%-os kivezérlési szinttel frekvenciamodulálják. A segédvivő csaknem teljes elnyomása következtében a jel—zaj viszony jelentősen megjavul.

Ahhoz, hogy a vevőoldalon a segédvivőt regenerálhassák, a vivővel kötött fázisban, 10%-ra normált 19 kHz-es vezérjelet (pilot) kevernek a spektrumba.

Az eddig felsorolt moduláló összetevők felső határa 53 kHz. További frekvencianövekedést jelent az ún. SCA csatorna üzemeltetése, ez esetben $f_{max}=74$ kHz.

SCA csatorna az USA-ban van. Az USA-ban nincs előfizetési díj, ezért a rádió és televízió társaságok a kisugárzott reklám- és propagandaadásokért befolyt jövedelemből tartják fenn magukat. Az SCA-műsor külön jövedelmi forrás, mivel e program egész napon át sugárzott zenéből áll, amelyet áruházak, vásárcsarnokok stb. részére adnak. E többletbevételt az URH-adó további kihasználásából eredően minimális rezsi terheli.

Ha az adó SCA műsort is sugároz, a kivezérlés foka a ferdén vonalkázott területekkel csökken.

Az összetett sztereojelet (továbbiakban Mpx) az SCA csatorna nélkül az alábbi függvény írja le:

$$f_{Mpx}(t)=(J+B)+U_p\cos\frac{\omega_v}{2}t+(J-B)\cos\omega_v t.$$

A következőkben kivonatosan közöljük az FCC 13 506 sz szabványtervezetét, majd azokat a várható paraméterváltozásokat, amelyekkel az OIRT módosítja az eredeti javaslatot.

a) Az alapsáv moduláló jele a jobb oldali (J) és bal oldali jelek (B) összegéből áll. Az összegjel hangfrekvenciás átviteli sávja 50—15 000 Hz-ig terjed.

b) A segédsáv segédvivő frekvenciájának előállításához 19 kHz frekvenciájú, ±2 Hz pontosságú vezérjelet kell kisugározni, a maximális löket 10%-ára normált szinten.

c) A segédsáv segédvivőfrekvenciája a vezérjel második harmonikusa (38 kHz ±4 Hz), a rezgés negatívból pozitívba való nullátmenetének ±3°-on belül egybe kell esnie a vezérjel ugyanilyen értelmű nullátmenetével (lásd 2. ábra).

d) A segédsávban AM-DSB/SC modulációt kell alkalmazni. A moduláló jel a J és B oldalinformációs jelek különbsége. A különbségjel hangfrekvenciás átviteli sávja 50—15 000 Hz-ig terjed. A vivőelnyomás akkora, hogy a vivőmaradék az adó hordozóját legfeljebb a maximális löket 1%-ig modulálhatja ki (—40 dB).

e) Az alapsáv és a segédsáv az adó vivőfrekvenciáját legfeljebb a megengedett maximális frekvencialöket 45—45%-ig modulálhatja akkor, ha csak egyetlen oldaljel, tehát csak J vagy csak B van jelen.

Bizonyítható, hogy ha a jobb és bal oldali sztereocsatorna között az áthallási csillapítás a teljes frekvenciasávban eléri a 29,7 dB-t, akkor a kivezérlésre és a fázishibára megadott fenti követelmények teljesülnek.

f) A csatornák polaritását úgy kell megválasztani, hogy pozitív növekedésű J jel pillanatértéke az alapsávban az adó vivőfrekvenciáját megnövelje (+ löket).

g) Az alap- és segédsáv amplitúdó- és fáziskarakterisztikájának az 50—15 000 Hz frekvenciatartományban azonosnak kell lennie.

h) Az FM-moduláció előkiemelése: 75 μs.

i) Az alap- és segédsávok közötti kölcsönös áthallási csillapítás 40 dB-nál nem lehet kevesebb.

j) A nemlineáris össztorzítás 25, 50 és 90%-os kivezérlés esetén sem az alapsávban, sem a segédsávban nem haladhatja meg az alábbi értékeket:

50— 100 Hz	között	3,5%
100— 7 500 Hz	között	2,5%
7500—15 000 Hz	között	3 %

k) A sztereoműsorral egyidejűleg SCA-műsor is sugározható. Erre a célra a maximális löket 10%-a áll rendelkezésre a 60 kHz-től 74 kHz-ig terjedő sávban.

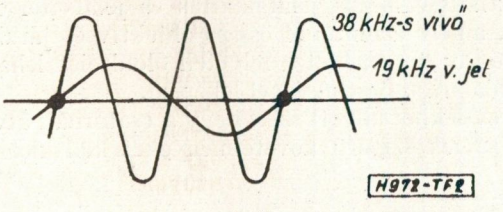
Eltérések a várható OIRT rendszer és az FCC szabvány között:

a) 75 μs-os előkiemelés helyett 50 μs.

b) A 38 kHz-es segédvivővel frekvencia- vagy időmultiplex eljárás, avagy polármoduláció alkalmazása egyaránt megengedett.

c) SCA program elmarad, a maximális moduláló frekvencia: 53 kHz.

Az adónak teljes mértékben ki kell elégítenie az FCC vagy a módosított OIRT szabványt.



2. ábra

A feltételek igen jó és bőséges tartalékú multiplexjel-előállítást és lineáris FM-modulációt követelnek meg.

Bár a megengedett maximális frekvencialöket változatlan, a nagy modulációs sávszélesség (50 Hz-től 53 kHz-ig) az FM-modulátor sávszélességét a jelenlegi monoadóénak kb. ötszörösére növeli. E követelmény be nem tartása az alap- és segédsáv kiegyensúlyozatlanságát és ez által áthallást okoz.

Az oldaljelek káros áthallása akkor is bekövetkezik, ha a nemlineáris torzítást nem tartjuk kellően kicsiny (max 0,2%) szinten. Minimálisra kell szorítani az intermodulációs torzítást is.

2.2. *Sztereo vételtechnika*

Követelmények a sztereo-dekódolót megelőző fokozatokra

Az előző fejezet adatai alapján nyilvánvalóvá válik, hogy az átviteli láncon belül minden paraméterváltozás az áthallási csillapítás romlásában jut kifejezésre.

Az áthallásnövekedés a visszahallgatáskor az oldaljelek intenzitásviszonyait megváltoztatja, következésképpen a hangforrás iránya módosul, esetleg meg sem állapítható, és így a sztereohatás elvész.

Mivel az oldaljeleket a reprodukáláskor az összeg- és különbségjelek lineáris kombinációival nyerjük, így logikus, hogy az összeg- és különbségjelekben fellépő ugyanazon oldaljel futásideje sem különbözhet. Ellenkező esetben az időkülönbség részben vagy teljes egészében kiegyenlíti az intenzitás-különbséget, a sztereohatás ismét lecsökken, határesetben pedig egyáltalán nem érvényesül.

További nehézséget okoz, hogy az amplitúdó- és fáziselőírásoknak a teljes frekvenciasávban teljesülniük kell, ellenkező esetben a sztereoátvitel legfontosabb paramétere, az áthallási csillapítás is leromlik. Jó minőségű rendszerektől 25—30 dB áthallási csillapítást várunk el.

A sztereovevő felépítése az aránydetektor kimenetéig megegyezik a monokészülékével. Természetesen a középfrekvenciás fokozatra és az FM demodulátorra — amely majdnem kizárólag aránydetektor — a későbbiekben ismertetett szigorúbb megkötések érvényesek.

Monoüzemben (monoadó vételekor) az aránydetektor kimenete közvetlenül a két párhuzamosan kapcsolt erősítő bemenetéhez csatlakozik.

Sztereoüzemre való átkapcsoláskor a dekódolót iktatjuk az aránydetektor kimenete és a hangfrekvenciás erősítőcsatornák közé.

A mono- és a sztereo-rádiókészülékek első lényeges különbsége a nagy- és középfrekvenciás fokozatok sávszélességében van.

A frekvenciamoduláció spektrumában a vivő- és az oldalsávfrekvenciák amplitúdóinak viszonya a modulációs index (m_f) függvénye:

$$m_f = \frac{\Delta\omega}{\omega_m}, \qquad (4)$$

amely a pillanatnyi löket és a pillanatnyi moduláló frekvencia hányadosa. A monotechnikában a legnagyobb löket ± 75 kHz, a legnagyobb moduláló frekvencia 15 kHz, így az ehhez tartozó modulációs index:

$$m_f = 5.$$

A legnagyobb sávszélesség:

$$B_{max} = \beta \cdot m_f \cdot f_{m_{max}} = 150 \text{ kHz},$$

ahol β értéke diagramból adódik [4].

Megjegyezzük, hogy a legnagyobb sávszélesség értéke attól függ, hogy az elvileg végtelen sok, de amplitúdóban egyre csökkenő oldalfrekvenciák átvitelét meddig akarjuk biztosítani.

A fent kiszámított sávszélesség nyolc oldalfrekvenciás komponenst vesz figyelembe, a 8-ik komponens amplitúdója a modulálatlan vivő amplitúdójának 2%-át éri el.

Ugyanilyen értelmezésben sztereoüzemben

$$B_{max\ sztereo} = \beta \cdot m_f \cdot f_{m_{max}} = 226 \text{ kHz}$$

sávszélesség adódik

Az FM-adók frekvenciatávolságát azonban 300 kHz-re állították meg. Kifogástalan sztereoüzemhez szükséges sávszélesség tehát igen rossz védettséget biztosíti a szomszédos csatornával szemben.

Kielégítő kompromisszum a 160—180 kHz-es sávszélesség betartása.

A nagyobb sávszélesség- és szelektivitás-igényből következik, hogy a monokészülékben eddig alkalmazott kf sávszűrő nem lesz megfelelő.

A második lényeges különbség a limiter működési viszonyaiban van. Sztereoműsor vételekor ugyanis a jel—zaj viszony 20 dB-lel romlik. Ezt a romlást feltétlenül korrigálni kell, különben a sztereo hangvisszaadás minősége nem lesz kielégítő. Ehhez egyrészt nagyobb (10-szeres) antennafeszültségre, másrészt nagy erősítésű előerősítők alkalmazásával a kf fokozatokat vezérlő feszültségek növelésére van szükség. Jó üzemi körülményeket igen hatásos amplitúdókorlátozással lehet elérni. Jó minőségű vevő limitere 8—10 μV bemenőjelre már teljes határolást nyújt.

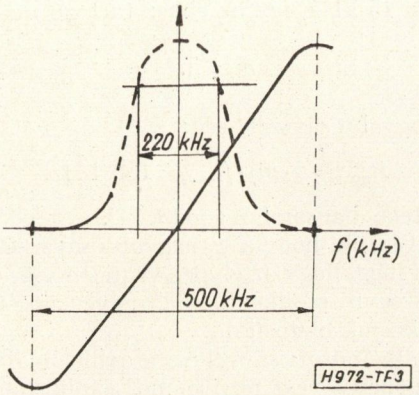
A harmadik megkötés a kf átvitel teljes szimmetriáját, valamint nagy stabilitását írja elő a teljes átviteli tartományban.

Ismeretes, hogy a szabályozott (AVC) csövek bemeneti kapacitása a rácsfeszültség függvényében változik, ami az előző kört elhangolhatja. Ez ellen a káros jelenség ellen katódköri áramvisszacsatolással védekezhetünk.

Ezenkívül az esetleges elhangolódást a sztereoadóra való pontatlan ráhangolás is okozhatja. Célszerű automatikus frekvenciaszabályozás (AFC) alkalmazása.

Korábban említettem a futásidő hatását az áthallásra. Ez természetesen a vevőre is fontos specifikáció. Jó sztereovételhez maximálisan 3,6 μs csoportfutási idő különbséget kell biztosítani. Ezt a kritikusnál kissé lazábban csatolt ($KQ_0 = 0{,}8$) sávszűrőkkel és pontos állomásrahangolással érhetjük el. A sávszűrők legyenek szimmetrikusak a harmonikus torzítás javítása végett.

Végezetül az aránydetektor S-görbéjének a kialakítására is változik a követelmény. A csúcstávolságot 500 kHz-re kell növelni, a kimeneti feszültségnek az 50 Hz—53 kHz frekvenciasávban lineáris menetűnek-



3. ábra Dióda újraéledési idő vizsgálata

kell lennie. Ez a feltétel maga után vonja, hogy az 50 μs-os utókiegyenlítő áramkör az aránydetektorban nem helyezhető el, hiszen az a nagyfrekvenciás komponenseket vágná. További követelmény az S-görbének a nullátmeneti pontra vonatkoztatott szimmetriája, és a nullátmeneti pont helyének a kf átviteli görbe f_0 frekvenciájával való lehető legpontosabb egyezése. A futási időkülönbség az aránydetektoron belül nem lehet nagyobb 0,3 μs-nál (lásd 3. ábra).

2.2.2. Követelmények a dekódolóra

A sztereodekódoló a multiplex jel oldaljelekre szétbontását végzi.

A legfontosabb követelmény, hogy az oldaljelek amplitúdója és fázisa helyesen reprodukálható és a csatornák áthallása minimális legyen.

A vezérjel és az abból előállított segédvivő fázisviszonyát az FCC szabványban leírt módon kell biztosítani.

Rendkívül fontos, hogy a kétoldalsávos segédcsatorna AM-demodulációja igen kicsiny nemlineáris torzítással történjék meg, mert az ilyen torzítások nyomán keletkező harmonikusok részben a jel—zaj viszonyt, részben az áthallást rontják.

Végezetül a dekódolónak lehetőség szerint legyen olyan vizuális kijelző áramköre, amely felhívja a hallgató figyelmét a sztereoprogram jelenlétére, és legyen automatikus mono-sztereo átkapcsolója.

A dekódolókat az alkalmazott áramköri megoldások alapján három csoportba osztjuk:

a) Mátrix (frekvencia-multiplex) eljárás.
b) Polárdemoduláció (burkoló detektor) eljárás.
c) Mintavételes (időmultiplex) eljárás.

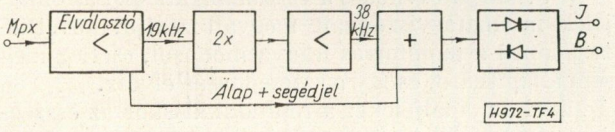
A mátrix dekódoló legegyszerűbb megoldása, hogy az alapsávra, segédsávra, pilotjelre egy-egy sávszűrőt hangolunk miáltal a multiplex jelet szétbontottuk összetevőire.

A pilotjelből előállított segédvivővel demoduláljuk a különbségjelet hordozó AM-DSB/SC jelet, majd az alapsávi jellel összegezve a mátrix áramkörben állítjuk elő a két oldalinformációt.

A mátrixfokozat a $J+B$ alap- és $J—B$ segédjel összegét és különbségét képezi.

$$(J+B)+(J-B)=2J$$
$$(J+B)-(J-B)=2B$$

Ily módon visszakapjuk a két oldalinformációt.



4. ábra

A burkolódetektoros módszerben az elnyomott vivőt visszaállítva, az Mpx jelet polármodulált jellé alakítjuk. A két burkoló leválasztásával visszanyerjük a J és B jeleket.

A mintavételes üzemű dekódoló az

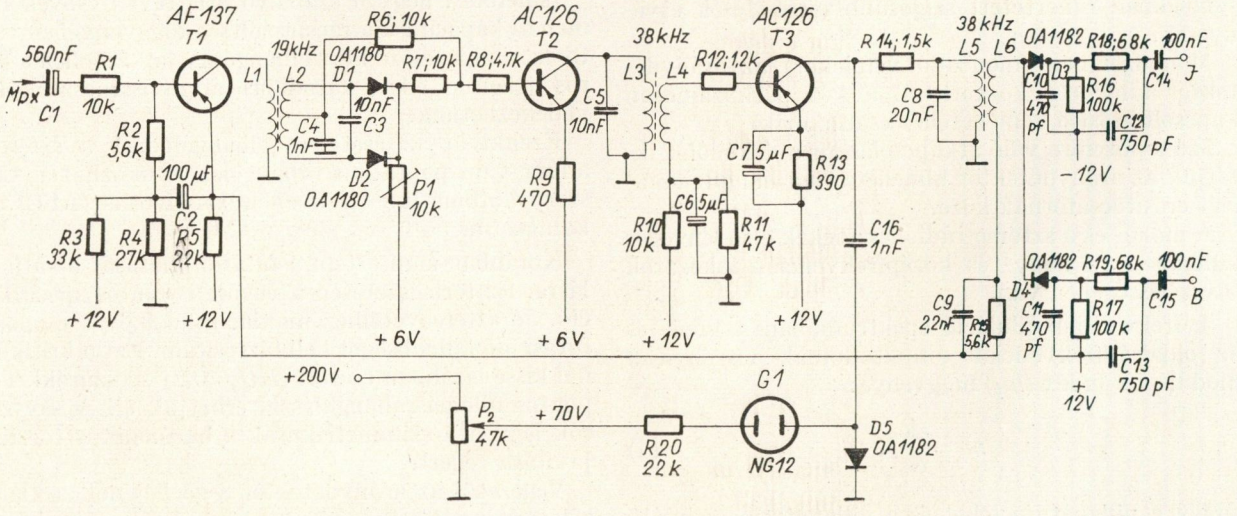
$$f_{Mpx}(t)=(J+B)+(J-B)\cos(2\pi\,38)t+U_p\cos\frac{2\pi\,38}{2}t$$

multiplex jelből mintákat vesz oly módon, hogy ha

$$\omega_v t=(2n+1)\pi \text{ és } n=0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots$$

akkor a $\cos\omega_v t$ függvény mindig negatív, tehát:

$$f_{Mpx}(t)=(J+B)-(J-B)=2B.$$



5. ábra

Ha a mintákat

$$\omega_v t = 2n\pi \text{ és } n = 0, 1, 2, \ldots\ldots$$

időpontokban vesszük, akkor cos $\omega_v t$ pozitív, és

$$f_{Mpx}(t) = (J + B) + (J - B) = 2J.$$

Így az oldaljelek ismét reprodukálhatók.

A dekódolótípusok összességére fennáll az az általános szabvány, hogy az 50 μs időállandójú utókiegyenlítő áramkört — az előzőkben már említett okokból — kivétel nélkül a csatornajelek szétválasztása után találjuk meg.

A szerző megméretezett és megépített egy burkolódetektoros (polárdemoduláció) elven működő FCC rendszerű dekódolót, amelynek tömbvázlatát a 4. ábrán elvi kapcsolását az 5. ábrán mutatjuk be.

A tömbvázlat alapján követhető az áramkör felépítése. Eszerint a dekódoló első fokozata olyan erősítő, amely az összetett multiplex jelből 19 kHz frekvenciájú szinuszos jelet, továbbá kis belső ellenálláson az alap- és segédsáv összegjeleit állítja elő.

A 19 kHz-es jel diódás frekvenciakétszerezőre kerül, ezt kétfokozatú hangolt erősítő követi, amely a 38 kHz-es segédvivőt regenerálja és kellő szinttel bocsátja az összeadó áramkörre, ahol a segédvivő és a multiplex jel fázishelyes összeadása megy végbe. Az összeadó áramkör kimenetén polármodulált jelet kapunk, amelyről a két csatorna információját egy-egy értelemszerűen kapcsolt burkolódetektorral választjuk le.

Mérési eredmények:

A méréseket $U_{be} = 0{,}8$ V jellel végezve:

Áthallási csillapítás:

100 Hz-en: 30 dB,
1 kHz-en: 35 dB,
8 kHz-en: 30 dB,
15 kHz-en: 26 dB.

Transzfer csillapítás —3 dB.

Torzítás: 1 kHz-en mérve a maradék 19, ill. 38 kHz-es komponensek kiszűrésével: 0,8%.

IRODALOM

1. *Dr. Barta I.* : Rádió vevőkészülékek 1966.
2. *Dr. Ferenczy P.*: Hírközléselmélet 1964.
3. *Moortgat—Pick, W.*: Transistor-Adapter mit phasenempfindlicher Gleichrichtung des Stereo—Signals. Funktechnik, 3 (1962), p. 70—73.
4. *Theodore Bially:* A Filterless Method for the Detection of FM—Stereo—Signals. Audio, Jan. 1962, p. 35—38.
5. *Schmidt, F.*: Der Grundig—Adapter für die USA—Stereo—Rundfunknorm. Funkschau, 5 (1962), p. 115—116.
6. *Schmidberger, W.*: Ein Stereo—Decoder mit automatischer Anzeige, Radio Mentor, Berlin 1963.

IV. Mikrohullámú Összeköttetések Kollokvium

A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya és a Híradástechnikai Tudományos Egyesület 1970. április 21—24 között az URSI (Nemzetközi Rádió Tudományos Unió) támogatásával rendezi meg a IV. Mikrohullámú Összeköttetések Kollokviumot. A kollokvium a mikrohullámú hírközlés problémáihoz csatlakozóan a következő témakörökkel foglalkozik:

hírközlő rendszerek elmélete,
hálózatelmélet,
elektromágneses térelmélet,
mikrohullámú technika,
mikrohullámú elektronika,
mikrohullámú és rendszer mérések.

A rendezőbizottság 174 előadást fogadott el, ezek többségét neves külföldi szakemberek jelentették be. Az előadások az elektronika széles területének legújabb eredményeit tárgyalják. Az előadások angol vagy orosz nyelven fognak elhangzani és csak a hozzászólásokat fogják tolmácsolni. A kollokvium anyaga öt kötetben, kb. 1700 oldal terjedelemben a nemzetközi tudományos tanácskozás időpontjára megjelenik az Akadémiai Kiadó gondozásában.

A IV. Mikrohullámú Összeköttetések kollokviumon való részvétellel kapcsolatos kérdésekben a Híradástechnikai Tudományos Egyesület (Bp. V., Szabadság tér 17. III. em. 377) ad felvilágosítást.

Svéd Műszaki Hét

A METESZ, a Magyar Kereskedelmi Kamara, valamint a Svéd—Magyar Kereskedelem fejlesztő Bizottság által rendezett „Svéd Műszaki Hét" keretében három nagysikerű híradástechnikai tárgyú előadás is elhangzott. Az előadásokon és az őket követő vitában iparunk számos neves szakembere vett részt. A nagy érdeklődésre való tekintettel lapunk egyik következő számában az előadásokat részletesebben ismertetjük, most csupán felsoroljuk őket:

N. O. Johannesson (L. M. Ericsson): A jövő távközlési rendszereinek szolgáltatásai.

N. Wästerlid (Philips Teleindustri A. B.): Korszerű középfrekvenciás modulációs tv adóberendezések félvezetős meghajtó fokozattal.

Y. Näslund (Philips Teleindustri A. B.): Tranzisztorizált ultrarövidhullámú, egycsatornás, modulrendszerű rádióberendezés a polgári légiforgalom föld és repülőgép közötti összeköttetése céljára.

Tartalmi összefoglalások

ETO 512.831:621.372.512

Dr. Jachimovits L.:

Lépcsős transzformátorok mátrixanalízise

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) 2. sz.

A dolgozatban a lépcsős átmenetek bemeneti feszültségi reflexiótényezőjét határozzuk meg, figyelembe véve a reflexiós csillapítások, a többszörös reflexiók és az ugráskapacitások hatását is. Kimutatjuk, hogy a reflexiós csillapítások és a többszörös reflexiók kvázi kölcsönösen kompenzálják egymás hatását. Meghatározzuk az egyes tápvonalszakaszok hosszának optimális értékét és kimutatjuk, hogy az ugráskapacitások amplitúdómódosító hatása kompenzálható a lépcsők méreteinek megfelelő megválasztásával. Befejezésül röviden összefoglaljuk a lépcsős transzformátorok méretezésének menetét és két numerikus példát közlünk.

ETO 539.219.1:621.382.002.2:669.782

Dr. Hahn E.—Kósza G.—Aczél J.:

Többszörös epitaxiális rétegek szennyezéseloszlása

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) 2. sz.

A kapacitás-feszültség karakterisztika felvételén alapuló mérési eljárás leírása után ismertetjük az igen kis fajlagos ellenállású n típusú alapkristályra épített tiszta réteg és az erre ráépített foszforral, illetőleg arzénnal doppolt n^+ réteg előállítási technológiájának kidolgozási fázisait. Először a tiszta, doppolásmentes rétegek szennyezéseloszlását vizsgáljuk, majd ismertetjük epitaxiális rétegek foszforral és arzénnel végzett szennyezésével kapcsolatos vizsgálataink. Megvizsgáltuk, hogyan függ az epitaxiális rétegek szennyezettsége különböző foszfor-triklorid és arzén-triklorid mennyiségeket tartalmazó $SiHCl_3$-ból, illetve $SiCl_4$-ből végezve a rétegek építését. A rétegek szennyezettségét négytűs és háromtűs fajlagos ellenállás méréssel és a rétegekből készített diódák kapacitás-feszültség karakterisztikájának felvételével határoztuk meg. Ezek alapján elkészített $(n_1^+)_{sz}-(n_2-n_3^+)_r$ kettős epitaxiális rétegek szennyezéseloszlását határoztuk meg sekély bór-diffúzióval készített diódák kapacitás-feszültség karakterisztikájából és a kapott profilgörbéket magyarázzuk. Végül röviden szólunk a hiperabrupt átmenetű diódák kapacitásviszonyai és a szennyezéseloszlás kapcsolatáról.

ETO 548.4:548.52:669.782—172

Székely T.-né—Varga L —Tornay I.:

Szilícium homoepitaxiális növesztése közben keletkező kristályhibák vizsgálata

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) 2. sz.

Vékony, de az egész Si kristályra kiterjedő homoepitaxiális növesztés során működésbe léphetnek a diszlokációforrások, amelyek mind az alap-, mind a növesztett rétegben növelik a rácshibasűrűséget és a kristály (111) típusú síkjaiban jól megfigyelhető diszlokációsorok alakulnak ki. Képződhetnek a növesztett rétegben nagy kiterjedésű rétegeződési hibák és a jellegzetes háromszögletű illeszkedési hibák mellett. A felület megmunkálásából a mélyebb rétegekben visszamaradó deformációs nyomok akkor is kedvezőtlenül befolyásolják a növesztés szerkezetét, ha a felületet egyébként mechanikailag tökéletesen síkra polírozták. A vizsgált vékonyrétegű növesztések esetében tehát a növesztett réteg legalább annyi hibát tartalmazott, mint az alapkristály.

ETO 621.3.064.001.24

Gosztony G.:

Többszörösen bekötött kimeneteket tartalmazó csatolóutas rendszerek méretezése

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) 2. sz.

Többszörösen lekötött kimeneti vonalakat tartalmazó csatolóutas irányválasztó kapcsolások számos típusát lehet méretezni Jensen képletének jelen cikkben kidolgozott általánosított alakjával. Más típusok méretezéséhez nincs pontos számítási eljárás. A javasolt közelítő módszerrel a torlódást egyszerűen lehet megállapítani, tetszőleges típusú rendszerben. A közelítő eljárás hibája az esetek többségében 10% körül van, a pontos számításhoz, ill. utánzási eredményekhez képest.

ETO 534.76:621.376.3:621.396.62

S. Tóth F.:

Sztereofónia

HÍRADÁSTECHNIKA XXI. (1970) 2. sz.

A tanulmány a sztereofónia néhány alapvető kérdésének ismertetésén túlmenően bemutatja röviden az FCC és a polármodulált rendszereket. A vétellel kapcsolatban részletesen elemzi a vevőkészülék középfrekvenciás fokozataira és FM demodulátorára előírt amplitúdó- és fázismeneteket, továbbá ismerteti a különböző elven működő sztereokódoló típusokat.
A munka második felében egy burkolódetektoros (polárdemoduláció) elven működő FCC rendszerű dekódolót mutatunk be.

Обобщения

ДК 512.831:621.372.512

Д-р Л. Яхимович:

Анализ матрицами ступенчатых трансформаторов

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. 1970) № 2

Определены коэффициенты отражения входногво напряжения ступенчатых переходов с учетом влияния затуханий отражения многокартных отражений и незапных изменений емкостей. Показано, что влияния затуханий отражения монгократных отражений взаимо компенсируются. Определены оптимальные величины длин отдельных участков фидера и показано, что влияние изменения амплитуд внезапных изменений ёмкостей можно компенсировать соответсвющим вюбором размеро ступней. Наконец обобщены методы проектирования ступенчатых трансформатовов и показан два прифровые примера.

ДК 539.219.1:621.382.002.2:669.782

Д-р Э. Хан—Г. Коса—Й. Ацел:

Распределение примесей многократных эпитаксиальных слоев

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. (1970) № 2

После описания метода имерения на основе принятия характеристики ёмкость-напряжение излагаются фазы технологии создания чистого слоя построенного на основной кристалл типа очень малого удельгого сопротивления и слоя n^+ с примесьями фосфора и мышьяка созданного на этом. В первый раз испытывается распределение примесей чистых слоев, а потом эпитаксиальных слоев с фосфором и мышьяком. Наконец кратко изложены соотношения между ёмкостями растределения примесей диодов с очень внезапным переходом.

Zusammenfassungen

DK 512.831:621.372.512

Dr. L. Jachimovits:

Matrixanalyse von Stufentransformatoren

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr 2.

In dem Artikel wird der Eingangsspanungsreflexionfaktor der Stufenübergänge bestimmt. Der Einfluss der Reflexionsdämpfungen, der mehrfachen Reflexionen und die Sprungkapazitäten werden auch in Acht genommen. Es wird bewiesen, dass die Reflexionsdämpfungen und die mehrfachen Reflexionen einander quasi gegenseitig kompensieren. Es werden die optimalen Werte der Länge der einzelnen Speiseleitungsstrecken bestimmt und es wird bewiesen, dass der amplitudenmodifizierende Einfluss der Sprungkapazitäten mit der entsprechenden Wahl der Grösse der Stufen kompensierbar ist. Zuletzt werden der Gang der Bemessung der Stufentransformatoren kurz zusammenugfasst und zwei numerische Beispiele vorgelegt.

DK 539.219.1:621.382.002.2:669.782

Dr. E. Hahn—G. Kósza—J. Aczél:

Verunreinigungsverteilung der mehrfachen Epitaxialschichten

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr 2.

Nach der Beschreibung des auf dem Grund der Aufnahme der Kapazität-Spannungcharakteristik liegenden Messverfahrens werden die Ausarbeitungsphasen der Herstellungstechnologie der reinen Schicht, die auf die Grundkristalle Typ n von sehr kleinem spezifischem Widerstand aufgebaut ist und der auf diese gebaute, mit Phosphor und Arsen dotierte n^+ Schicht erörtert. Zuerst werden die Verunreinigungen del reinen, undotierten Schichten geprüft, ferner die Prüfungen in Verbindung mit der Verunreinigung der epitaxialen Schichten mit Phosphor und Arzen erörtert. Zuletzt wird kurz der Zusammenhang zwischen den Kapazitätsverhältnissen der Dioden mit „hyperabrupt" Übergang und ihrer Verunreinigungsverteilungen erwähnt.

ДК 548.4:548.52:669.782—172

Т. Секель—Л. Варга—И. Торнаи:

Испытание ошибок кристаллов в течение однородного эпитаксиального выращивания кремния

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. (1970) № 2

В течение выращивания тонких кремиевы кристаллов могут действовать источники дислокации, которые увеличивают плотность ошибок кристаллической решётки как в основном, так в выращенном слое и вызывают хорошо заметные ряды дислокаций в плоскостях типа (III) кристаллов. Ошибки слоев большого расширения могут быть тоже вызваны в вызванном слое рядом с характерными треугольными обшивками приспособления. Следы деформации в глубоких слоях вследствие обработки поверхности влияют неблагоприятно на структуру выращивания именно в случае, если поверхность была полирована в механически совершенную плоскость. В случае испытанных тонкопленечных выращиваний, выращиванный слой содержит минимально такое число ошибок, как основной кристалл.

АК 621.3.062.001.24

Г. Гостонь:

Проектирование систем путей связи содержающие многократно соединенные выходы

HÍRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт) XXI. (1970) № 2

Формула Йенсена, в ее обобщенной форме разработанной в этой статье, дает возможность проектирования многих типов схем для выбора направления, содержающих многократно соединенных выходных линий. К проектированию других типов точного метода проектирования нет. С помощью предложенного приблизительного метода накопление может быть легко определено в системе любого типа. Ошибка приблизительного метода является около 10 м в большинстве случаев, по сравнению к результатам точного расчета или же симуляции.

КД 534.76:621.376.3:621.396.62

Ф. Ш. Тот:

Стереофонические системы

HIRADÁSTECHNIKA (ХИРАДАШТЕХНИКА, Будапешт, XXI./1970) № 2

Статья — после изложения некоторых основных вопросов — представит кратко системы FCC и полярной модуляции. Подробно анализируется амплитудная и фазовая характеристика предписанная для каскадов ПЧ и демодулятора ЧМ приемника, далее типы стереокодовых устройств работающих по различным принципам. Во второй части статьи показывается декодер системы FCC работающий по принципу детектора огибающей (поляная демодуляция).

DK 548.4:548.52:669.782—172

Frau T. Székely—L. Varga—I. Tornay:

Prüfung der beim Züchten von homoepitaxialen Si-Schichten auftretenden Kristallfehler

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr 2.

Während des Züchtens von dünnen, aber sich auf den ganzen Si-Kristall ausbreitenden homoepitaxialen Schichten können die Dislokationsquellen, die sowohl in dem Grund- als auch in der gezüchteten Schicht die Gitterfehlerdichte vermehren funktionieren. In den Ebenen (111) der Kristalle bilden sich gut bemerkbare Dislokationsreihen. In den gezüchteten Schichten können sich auch Schichtfehler von grosser Ausbreitung neben den charackteristischen dreieckigen Anpassungsfehler bilden. Die Struktur des Züchtens wird dann auch ungünstig durch die Deformationsspuren, die während der Bearbeitung der Oberfläche in den tieferen Schichten zurückblieben, beeinflusst, wenn die Oberfläche sonst mechanisch in eine vollkommene Ebene poliert wurde. Im Falle der geprüften dünnschichtigen Züchten enthielt die gezüchtete Schicht mindestens so viel Fehler, wie der Grundkristall.

DK 621.3.062.001.24

G. Gosztony:

Bemessung von Systemen der Zwischenleitungsanordnungen mit mehrfach angeschlossenen Ausgängen

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr 2.

Mit der in dem Artikel erörterten verallgemeinerten Form der Jensen'schen Formel können viele Typen der Zwischenleitungsschaltungen für Richtungsauswahl mit mehrfach angeschlossenen Linien bemessen werden. Zur Bemessung anderer Typen gibt es keine genaue Berechnungsmethode. Mit der vorgeschlagenen Annäherungsmethode kann die Anhäufung in einer Anordnung beliebigen Types einfach bestimmt werden. Der Fehler des Annäherungsverfahrens im Vergleich mit der genauen Berechnung und Simulationsresultate in der Mehrheit der Fälle beträgt etwa 10%.

DK 534.76:621.376.3:621.396.62

F. S. Tóth:

Stereophonie

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) Nr 2.

Nach der Erörterung einiger Grundfragen der Stereophonie werden kurz die FCC und polarmodulierte Systeme dargelegt. In Zusammenhang mit dem Empfang werden die für die Zwischenfrequenzstufen des Empfangerätes und für den FM Modulator vorgeschriebenen Amplituden- und Phasengänge eingehend analysiert und ferner die Stereokodertypen, die auf verschiedenen Prinzipien funktionieren, erörtert. In dem zweiten Teil der Arbeit wird ein Dekoder vom System FCC der auf Prinzip des Umhüllungsdetektors (Polardemodulation) funktioniert, erörtert.

Summaries

UDC 512.831:621.372.512

Dr. L. Jachimovits:

Matrix Analysis of Stage-Type Transformers

HÍRALÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 2.

In the paper the input voltage reflexion factor of the stage-type transition is determined taking into account the effect of reflexion attenuations, of the multiple reflexion and jump capacities. It is shown that the reflexion attenuations and the multiple reflexions almost compensate each other. The optimum value of the length of individual feeder sections is determined and it is shown, that the amplitude modifying effect of the jump capacities can be compensated with the adequate choice of the dimensions of the stages. Finally a short summary is given of the course of design of stage transformers and two numerical examples are presented.

UDC 539.219.1:621.382.002.2:669.782

Dr. E. Hahn—G. Kósza—J. Aczél:

Distribution of Impurities of Multiple Epitaxial Layers

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 2.

After describing the measuring method based on the characteristics capacity-voltage, the authors present the phases of development of the technology of the method obtaining the pure layer built on n type basic crystal with a low specific resistance and the production technology of the n^+ layer built on it. This n^+ layer was doped with phosphor and arsenic. First the authors tested the distribution of the impurities of the pure undoped layers and further present their tests in connection with the doping of the epitaxial layers with phosphor and arsenic. Finally a brief description is given of the relation between capacitances of the diodes of hyperabrupt transition and of the distribution of impurities in them.

Résumés

CDU 512.831:621.372.512

Dr. L. Jachimovits:

Analyse par matrices des transformateurs à étages

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) No 2.

Les coefficients de réflexion de la tension d'entrée des transits à étages sont déterminés, considérant aussi l'effet des réflexions multiples, des affaiblissements de réflexion et des capacités des transits brusques. On peut constater que les affaiblissements de réflexion et les réflexions multiples presque se compensent mutuellement. Les longueurs optimales des sections de ligne de transmission sont déterminées et la possibilité de la compensation de la modification des amplitudes en conséquence des capacités des transits brusques par le choix convenable des dimensions des étages est démontrée. Enfin la méthode de calcul des transformateurs à étages est brièvement récapitulée et deux exemples sont donnés.

CDU 539.219.1:621.382.002.2:669.782

Dr. E. Hahn—G. Kósza—J. Aczél:

Distribution des impuretés des couches épitaxiales multiples

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) No 2.

Apres la déscription de la méthode de mesure basée sur la trace de la caractéristique capacité-voltage les phases du développement de la technologie de production de la couche pure du cristal de type n ayant une résistance spécifique très basse et de la couche n^+ contaminée par phosphore on arsénic, déposée sur la première, sont descrites. Les résultats des essais concernant la distribution des impuretés des couches pures et ensuite ceux des couches épitaxiales contaminées par phosphore et arsénic sont analysés. Enfin les rélations entre la capacité et distribution des impuretés des diodes à jonction avec transitions très soudaines sont brièvement exposées.

UDC 548.4:548.52:669.782—172

Mrs. T. Székely—L. Varga—I. Tornay:

Examination of Crystal Defects Arising During the Growing of Silicon Homoepitaxial Layer

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 2.

Dislocation sources may be operating in the course of growing thin homoepitaxial layers spreading over the whole silicon crystal. These dislocation sources increase the density of grid defects both in the basic and grown layer and series of well noticeable dislocations are developed in the planes type (111) of the crystals. Layer defects of large expansion can form also in the grown layer near the characteristic triangular junction defects. The structure of the growing is unfavourably influenced by the deformation traces remaining in the deeper layers due to working of the surface even then if the surface is mechanically polished into a perfect plane. In the case of the examined growings of thin layers the grown layers contained at least as many defect as the basic crystal.

CDU 548.4:548.52:669.782—172

Mme. T. Székely—L. Varga—I. Tornay:

Examen des fautes des cristaux provenant pendant l'croissence homoépitaxial de silicium

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) No 2.

Pendant l'croissence homoépitaxial sur la surface totale d'un cristal mince des sources de dislocation peuvent fonctionner qui augmentent éa densité des fautes de grille tant dans la couche de base que dans la couche accrue et des séries de dislocation bien notables le forment dans les plaines du type (111) du cristal. La formation des fautes de couches de grande extension dans la couche accrue est aussi possible à coté des fautes d'adaptation triangulaires caractéristiques. Les traces de déformation dans les couches profondes en travaillant la surface influencent défavorablement la structure de l'croissence ainsi dans le cas, si la surface a été polie mécaniquement pour former une plaine parfaite. Dans le cas des couches minces accrues le nombre des fautes a été au moins si haut comme dans la couche de base.

UDC 621.3.062.001.24

G. Gosztony:

Design of Link Systems Having Multiplexed Outputs

Dr. L. Jachimovits:

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 2.

Numerous types of link circuits for the selection of direction can be designed by the generalized form of Jensen's formula worked out in the present paper. For the design of other types there is no accurate procedure of computation. With the proposed approximative method the congestion can be simply determined in an arbitrary system. The error of the approximative procedure is in the majoriity of the cases about 10% compared to the accurate computation and results of simulation.

CDU 621.3.062.001.24

G. Gosztony:

Projet des systèmes à voies de liaison contenant des sorties multiples

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) No 2.

On peut projeter plusieurs types des circuits à voies de liaison pour la sélection de la direction comprenant lignes de sortie multiples par la forme généralisée de la formule de Jensen, développée dans l'article présent. Il n'y a pas une méthode de calcul précise pour autres types. On peut déterminer simplement la congestion dans systèmes de quelconque type. L'erreur de la méthode approximative est environ 10% dans la majorité des cas en comparaison du calcul précis ou bien des résultats de simulation.

UDC 534.76:621.376.3:621.396.62

F. S. Tóth:

Stereophony

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 2

In addition to the description of some basic problems of stereophony the paper presents the FCC and polar modulated systems. In connection with the reception it analyses in detail the amplitude and phase response prescribed for the intermediate frequency stages of the receivers and for the FM demodulator further presents the types of stereocoders working on different principles. In the second part of the paper a decoder of the FCC system working on the principle of envelope detector (polar demodulation) is described.

CDU 534.76:621.376.3:621.396.62

F. S. Tóth:

Stéréophonie

HÍRADÁSTECHNIKA (Budapest) XXI. (1970) N° 2

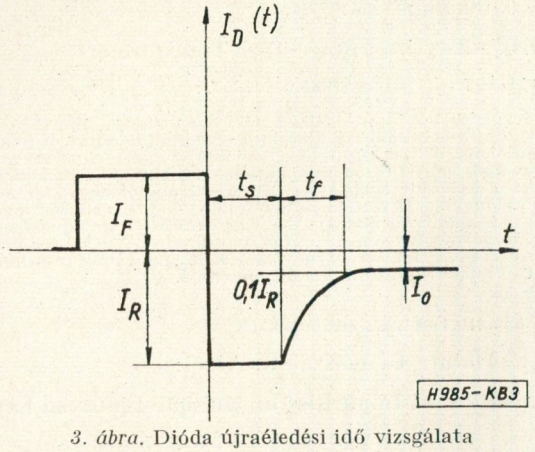
L'article présente — en dehors de l'exposition de quelques problèmes fondamentaux de la stéréophonie — les systèmes FCC et la modulation polaire. Les caractéristiques d'amplitude et de phase préscrites pour les étages de moyenne fréquence et démodulateur à modulation de fréquence de récepteur sont analysées en détail, ainsi que les types du stéréodécodeur fonctionnants dans des principes différents sont déscrits. Dans la deuxième partie de l'article un décodeur d'envéloppe (demodulation polaire) de système F.C.C. est présenté.

Helyreigazítás

Lapunk ez évi 1. számában a 10. oldalon, *Kocsis Miklós—Bártfai Pálné:* „Epitaxiás felépítésű félvezető eszközök" c. cikkben sajnálatos sajtóhiba folytán a 3. ábra helyére idegen ábra került.

Mellékeljük a cikk helyes ábráját, mely lapunk ezen helyéről a lap tartalmának csonkítása nélkül kivágható és a megfelelő helyre beragasztható.

Egyúttal a szerző és az olvasók szíves elnézését kérjük a hibáért.



3. ábra. Dióda újraéledési idő vizsgálata

MŰSZAKI KÖNYVTÁR

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