

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TERMINĖS DIFUZIJOS PROCESO TYRIMAS, TRANZISTORIŲ EKVIVALENTINIŲ
GRANDINIŲ SCHEMŲ SUDARYMAS IR AKUSTOELEKTRONINIO ĮTAISO
PROJEKTAVIMAS

ELEKTRONIKOS ĮTAISŲ KURSINIO DARBO UŽDUOTIS

Darbą atliko: EI-08/2 gr. studentas
Maksim Norkin

Darbą tikrino: V.Malinauskas

Turinys

1	Įvadas	2
2	Šiluminė priemaišų difuzija	2
2.1	Priemaišų difuzijos mechanizmas ir greitis	2
2.2	Difuzijos procesų teorija	3
3	Difuzijos proceso tyrimas	5
3.1	Apskaičiuoti ir nubraižyti priemaišų pasiskirstymą po priemaišų įterpimo etapo	5
3.2	Apskaičiuoti ir nubraižyti, kaip priemaišų įterpimo etape kinta priemaišos srauto tankis ir legiravimo dozė	6
3.3	Apskaičiuoti ir nubraižyti priemaišų pasiskirstymą po priemaišų perskirstymo etapo .	7
3.4	Apskaičiuoti ir nubraižyti priemaišų pasiskirstymą tranzistoriuje, formuojamame dvikartės difuzijos būdu	7
4	Dvipolio tranzistoriaus parametrų skaičiavimas ir ekvivalentinės grandinės schemos sudarymas	8
4.1	Rasti dvipolio tranzistoriaus h parametrus	8
4.2	Sudaryti tranzistoriaus Π pavidalo ekvivalentinės grandinės schemą, rasti jos elementų parametrus	9
4.3	Apskaičiuoti išėjimo srovės kintamąją dedamąją, kai kintamoji įėjimo įtampa yra 115mV	9
4.4	Rasti žemo dažnio įtampos stiprinimo koeficientą, kai apkrovos varža lygi 892Ω . . .	10
5	Lauko tranzistoriaus parametrų skaičiavimas ir ekvivalentinės grandinės schemos sudarymas	10
5.1	Nubraižyti lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristikas, kai $U_{DS} = 3, 7, 11V$	10
5.2	Apskaičiuoti lauko tranzistoriaus parametrus nurodytame darbo taške	10
5.3	Sudaryti lauko tranzistoriaus ekvivalentinės grandinės schemą	11
5.4	Apskaičiuoti f_T , kai $C_{11} = 9$, $C_{12} = 4$ pF	11
5.5	Apskaičiuoti kintamąją išėjimo srovės dedamąją, kai kintamosios įėjimo įtampos amplitudė yra 135 mV	11
5.6	Rasti žemo dažnio įtampos stiprinimo koeficientą, kai apkrovos varža lygi 621Ω . . .	11
6	Akustinės elektronikos įtaiso projektavimas	12
7	Išvados	14
8	Literatūra	14

1 Įvadas

Svarbiausieji šiuolaikinės elektroninės aparatūros komponentai yra silicio integriniai grandynai. Jų elementai ir juos jungiantys laidieji takeliai suformuojami vienu technologinių procesų ciklu ir sudaro nedalomą visumą.

Silicio integrinių grandynų gamybos technologinius procesus galima suskirstyti į tris grupes:

- Silicio plokštelių bei grandynų korpusų detalių ir mazgų gamybos procesai.
- Puslaidininkų elementų formavimo silicio plokštelėse procesai.
- Integrinių grandynų surinkimo, kontrolės ir bandymo procesai.

Analizuojant tranzistorinius stiprintuvus ir kitus įtaisus, tranzistoriai pakeičiami ekvivalentinėmis grandinėmis. Viena ar kita ekvivalentinė grandinė pasirenkama, atsižvelgiant į tai, koks klausimas nagrinėjamas.

Kai nagrinėjamas tik silpnų virpesių perdavimas, nepaisoma tranzistoriaus įtampų ir srovių nuolatinių dedamųjų. Tada tranzistoriaus ekvivalentinės grandinės sudaromos remiantis lygtimis, aprašančiomis tranzistorių kaip tiesinį aktyvųjį keturpolį. Dažniausiai naudojamos T ir Π pavidalo ekvivalentinės grandinės.

Didėjant integrinių grandynų integracijos laipsniui, mažėja elektroninės aparatūros masė, tūris, savikaina, didėja jos patikimumas, plečiasi funkcinės galimybės. Kita vertus, integriniuose grandynuose dažniausiai realizuojami tik tranzistoriai, diodai, rezistoriai ir nedidelės talpos kondensatoriai.

Nuo tada, kai buvo sukurti integriniai grandynai, iškilo filtrų, vėlinimo linijų ir kitų komponentų, kuriems reikalingi induktyvumo elementai, miniatiūrizavimo problema. Sprendžiant šią problemą, buvo tobulinami aktyvieji filtrai, komutuojamos talpos filtrai, diegiami skaitmeniniai informacijos apdorojimo būdai. Be to, virpesių filtravimui ir vėlinimui buvo pradėtos taikyti paviršinės akustinės bangos, ir susiformavimo nauja funkcinės elektronikos kryptis - akustinė elektronika.

Kursinio darbo metu ištirsime terminės difuzijos procesą, kuris taikomas antrame silicio integrinių grandynų gamybos technologiniam procese, sudarysim tranzistorių ekvivalentinių grandinių schemas ir suprojektuosime akustoelektronikos įtaisą.

2 Šiluminė priemaišų difuzija

Difuzija (log. *diffusio* - sklidimas) yra kryptingas medžiagos dalelių skverbimasis jų tankio mažėjimo link dėl šių dalelių chaotiško judėjimo. Gaminant puslaidininkinius įtaisus ir puslaidininkinius integrinius grandynus, difuzijos reiškinys panaudojamas puslaidininkiams legiruoti. Aukštoje temperatūroje difuzijos būdu į paviršinį puslaidininkio sluoksnį įterpus priemaišų, galima pakeisti šio sluoksnio laidumo tipą arba sudaryti lokalias kitokio laidumo sritis.

2.1 Priemaišų difuzijos mechanizmas ir greitis

Šiluminė priemaišų difuzija vyksta dėl difunduojančios medžiagos - difuzanto - koncentracijos gradiento.

Priemaišiniai atomai į kietuosius kūnus gali skverbtis keliais būdais: užimdami vakansijas, praskverbdami tarp mazgų ir pasikeisdami vietomis su gretimais atomais.

Tikimiausias yra pirmasis priemaišų atomų difuzijos mechanizmas, nes aukštoje temperatūroje vakansijų gali būti gana daug. Jos atsiranda kaip Šotkio arba Frenkelio defektai. Kylant temperatūrai, vakansijų tankis auga, priemaišinių atomų skverbimosi per vakansijas tikimybė didėja. Beje, didėjant

prasiskverbusių į padėklą priemaišų tankiui ir dėl to mažėjant vakansijų tankiui, svarbesnis tampa antrasis priemaišų skverbimosi kelias - per tarpmazgius. Mažiausiai tikėtinas trečiasis priemaišinių atomų skverbimosi būdas, nes gretimi atomai gardelės mazguose gali pasikeisti vietomis tik įgiję gana daug energijos.

Difuzijos proceso greitį apibūdina difuzijos koeficientas. Šiluminės priemaišų difuzijos koeficientas D paprastai išreiškiamas kvadratiniais centimetrais per sekundę (cm^2/s). Jo skaitinę vertę reiškia skaičių dalelių, pereinančių per 1 cm^2 plotą per 1 s , kai priemaišos atomų tankio gradientas lygus 1 cm^{-4} .

Difuzijos koeficientas labai priklauso nuo temperatūros. Jai kylant, difuzijos koeficientas sparčiai didėja. Priklausomybė $D(T)$ išreiškiama Arenijaus (*Arrhenius*) lygtimi:

$$D = D_0 e^{-W_a/kT}; \quad (1)$$

čia D_0 - proporcingumo koeficientas; W_a - difuzijos proceso aktyvacijos energija; k - Bolcmano konstanta; T - difuzijos proceso temperatūra.

Koeficientas D_0 priklauso nuo puslaidininkio ir priemaišos tipo, kristalo-grafinės krypties, kuri vyksta difuzija, ir pradinio priemaišų tankio. Aktyvacijos energija W_a priklauso nuo puslaidininkio, priemaišos tipo ir difuzijos mechanizmo. Jei į silicį difunduoja boras, tai $W_a \approx 3,7 \text{ eV}$, jei fosforas, - $4,4 \text{ eV}$.

Kadangi koeficientas D_0 ir aktyvacijos energijos energija W_a priklauso nuo daugelio veiksnių, tai ankstesnė lygtis gerai tinka tik difuzijos koeficiento D priklausomybių nuo T ir W_a pobūdžiui išreikšti. Praktikoje priemaišos difuzijos koeficientas randamas iš literatūroje pateikiamų grafikų, sudarytų remiantis eksperimentų rezultatais.

2.2 Difuzijos procesų teorija

Difuzijos teorija pagrįsta dviem dėsniais, kuriuos 1855 m. suformulavo šveicarų mokslininkas A.Fikas (*Fick*).

Taikydami pirmą difuzijos dėsni priemaišų difuzijai ir laikydami, kad priemaišiniai atomai skverbiasi į kristalą x ašies kryptimi, galime rašyti:

$$J(x, t) = -D \frac{\delta N(x, t)}{\delta x} \quad (2)$$

čia J - priemaišos atomų srauto tankis, N - priemaišos atomų tankis, t - laikas.

Antro Fiko dėsniio matematinę išraišką galima išvesti remiantis pirmuoju dėsniu.

Imkime ploną sluoksnį δx tarp dviejų vienetinio ploto plokštumų, statmenų difuzinio srauto kryptims. Sakykime, kad priemaišos tankis sluoksnyje laiko momentu t yra $N(x, t)$. Prabėgus laikui δt , priemaišos tankis tampa $N(x, t + \delta t)$. Tada priemaišos atomų skaičiaus pokytis nagrinėjamame sluoksnyje per laiką δt yra

$$[N(x, t + \delta t) - N(x, t)]\delta x = \frac{\delta N(x, t)}{\delta t} \delta t \delta x \quad (3)$$

Priemaišos tankis kinta todėl, kad priemaišos atomų srautas $J(x, t)$, tekantis į nagrinėjamąjį sluoksnį per 1 plokštumą, skiriasi nuo ištekančio per 2 plokštumą srauto $J(x + \delta x, t)$. Dėl to, kad šie srautai nevienodi, priemaišos atomų skaičiaus pokytį sluoksnyje δx per elementarųjį laiką δt galima išreikšti formule:

$$[J(x, t) - J(x + \delta x, t)]\delta t = -\frac{\delta J(x, t)}{\delta x} \delta x \delta t. \quad (4)$$

Sulyginę ankstesnes dvi formules, gauname:

$$\frac{\delta N(x, t)}{\delta t} = -\frac{\delta J(x, t)}{\delta x} \quad (5)$$

Įrašę į šią lygtį srauto tankio išraišką, gauname diferencialinę lygtį, kuria išreiškiamas antrasis Fiko dėsnis:

$$\frac{\delta N(x, t)}{\delta t} = D \frac{\delta^2 N(x, t)}{\delta x^2} \quad (6)$$

Ši lygtis aprašo priemaišos kaupimosi greitį. Ja naudojantis galima nagrinėti difuzijos proceso dinamiką.

Išsprendus antro Fiko dėsnio lygtį, randama priemaišos tankio priklausomybė nuo difuzijos trukmės ir koordinatės, taigi galima apskaičiuoti priemaišos pasiskirstymą kristale bet kuriuo laiko momentu. Priemaišos tankio priklausomybė nuo koordinatės vadinama koncentracijos profiliu, arba legiravimo profiliu.

Praktikoje pasitaikančias priemaišų difuzijos sąlygas gana greitai atitinka du paprasti teoriniai modeliai: difuzija iš nesenkančio šaltinio ir difuzija iš riboto šaltinio.

Laikoma, kad difuzijos šaltinis yra nesenkantis, jeigu priemaišos atomų tankis kristalo paviršiuje nekinta - jeigu $N(0, t) = N_0 = const$, kai $t \geq 0$. Atsižvelgus į pradinę sąlygą $N(x, t) = 0$, kai $x \geq 0$ ir $t = 0$, bei ribinę sąlygą $N(x, t) = 0$, kai $x \rightarrow \infty$ ir $t \geq 0$, gaunamas toks antrosios Fiko diferencialinės lygties sprendinys:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (7)$$

čia erfc - papildoma paklaidų funkcija (*error function complement*), išreiškiama formule:

$$\operatorname{erfc}(y) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y \exp(-y^2) dy \quad (8)$$

Dydis \sqrt{Dt} vadinamas difuzijos nuotoliu.

Pagal $N(x, t)$ išraišką, priemaišos atomų tankio pasiskirstymą lemia difuzijos koeficientas D (proceso temperatūra T) ir difuzijos proceso trukmė t . Vykstant difuzijai iš nesenkančio šaltinio, didesniame gylyje priemaišos tankis yra mažesnis. Tam tikrame gylyje, kol vyksta difuzija, priemaišos atomų tankis didėja. Jei difuzijos procesas vyktų pakankamai ilgai, priemaišos atomų tankis bet kuriame gylyje taptų toks, kaip paviršiuje.

Nuo difuzijos proceso temperatūros ir trukmės priklauso ir legiravimo dozė Q - skaičius priemaišos atomų, perėjusių per vienetinį padėklo paviršiaus plotą per difuzijos laiką t .

Žinodami $N(x, t)$, galime rasti difuzijos srauto tankį. Taikydami pirmąjį Fiko dėsnį, galime rašyti:

$$J(0, t) = -D \frac{\delta N(x, t)}{\delta x} \Big|_{x=0} \quad (9)$$

Į šią formulę įrašę priemaišos pasiskirstymo išraišką, gauname:

$$J(0, t) = D \frac{N_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-(x/2\sqrt{Dt})^2} \Big|_{x=0} = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi}} \quad (10)$$

Suintegravę priemaišos atomų srautą per vienetinio ploto padėklo paviršių, gauname legiravimo dozę:

$$Q(t) = \int_0^t J(0, t) dt = \dots = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (11)$$

Praktikoje šiluminės priemaišų difuzijos procesą dažniausiai sudaro dvi stadijos. Difuzija iš nesenkančio šaltinio vyksta pirmojoje - *priemaišų įterpimo* stadijoje. Šioje stadijoje į ploną paviršinių kristalo sluoksnį įterpiamas reikiamas priemaišos kiekis. Antrojoje - *priemaišų perskirstymo* stadijoje - aukštesnėje temperatūroje suformuojamas legiravimo profilis.

Dažnai antrojoje difuzijos stadijoje atliekamas ir paviršiaus oksidavimas. Todėl antrojoje stadijoje priemaišiniai atomai per padėklo paviršių neprasiskverbia ir legiravimo dozė nekinta. Tada difuzija vyksta iš riboto šaltinio - iš pirmojoje stadijoje legiruoto paviršinio sluoksnio. Šiomis sąlygomis

antrosios Fiko diferencialinės lygties sprendinys išreiškiamas formule:

$$N(x, t') = \frac{Q}{\sqrt{\pi D' t'}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D' t'}\right) \quad (12)$$

čia D' - priemaišos difuzijos koeficientas priemaišų persiskirstymo etape, t' - šio etapo trukmė.

Pastaroji formulė atitinka Gauso (Gauss), arba normalųjį, pasiskirstymą. Kreivių parametras yra difuzijos koeficiento ir proceso trukmės sandauga. Pradžioje (kai $D' t' = 0$) priemaišos atomų tankis padėklo paviršiuje paprastai atitinka ribinį priemaišos tirpumą. Didėjant sandaugai $D' t'$, priemaišiniai atomai iš paviršinio sluoksnio skverbiasi gilyn į padėklą. Todėl prie padėklo paviršiaus priemaišos tankis mažėja, padėklo gilumoje - didėja. Kreivių ribojamas plotas nekinta, nes nekinta legiravimo dozė.

Remiantis gautomis išraiškomis, galima teoriškai parinkti šiluminės priemaišų difuzijos procesų sąlygas.

Sakykime, kad į padėklą, kuriame pradinis priemaišos atomų tankis N_{pr} , atliekama kito tipo priemaišos šiluminė difuzija. Po antrosios difuzijos stadijos padėklo paviršiuje reikia gauti difunduojančios priemaišos atomų tankį N_0 . Kito laidumo tipo difuzinio sluoksnio storis (pn sandūros gylys) turi būti x_{pn} .

Pagal suformuluotą užduotį turi būti tenkinamos sąlygos $N(0, t) = N_0$ ir $N(x_{pn}, t) = N_{pr}$. Pasi-
naudoję šiomis sąlygomis, gauname:

$$N_0 = \frac{Q}{\sqrt{\pi D' t'}} \quad (13)$$

ir

$$N_{pr} = \frac{Q}{\sqrt{\pi D' t'}} \exp\left(-\frac{x_{pn}^2}{4D' t'}\right) = N_0 \exp\left(-\frac{x_{pn}^2}{4D' t'}\right) \quad (14)$$

Pagal šią išraišką, gauname:

$$x_{pn}^2 = 4D' t' \ln \frac{N_0}{N_{pr}} \quad (15)$$

Taikydami šią formulę, galime rasti pn sandūros gylį arba parinkti difuzijos proceso sąlygas (proceso temperatūrą ir trukmę), kad sandūra sudarytų reikiamame gylyje. Tuomet, remiantis N_0 išraišką, galima rasti legiravimo dozę:

$$Q = N_0 \sqrt{\pi D' t'} \quad (16)$$

Žinodami reikalingą legiravimo dozę, pirmosios difuzijos stadijos sąlygas (temperatūrą ir trukmę) galime parinkti remiantis

$$Q(t) = .. = 2N_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (17)$$

Panašiai difuzijos proceso režimą teoriškai galima parinkti ir tuo atveju, kai taikoma tik viena - priemaišų įterpimo - stadija. Tuomet reikia remtis

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (18)$$

3 Difuzijos proceso tyrimas

3.1 Apskaičiuoti ir nubraižyti priemaišų pasiskirstymą po priemaišų įterpimo etapo

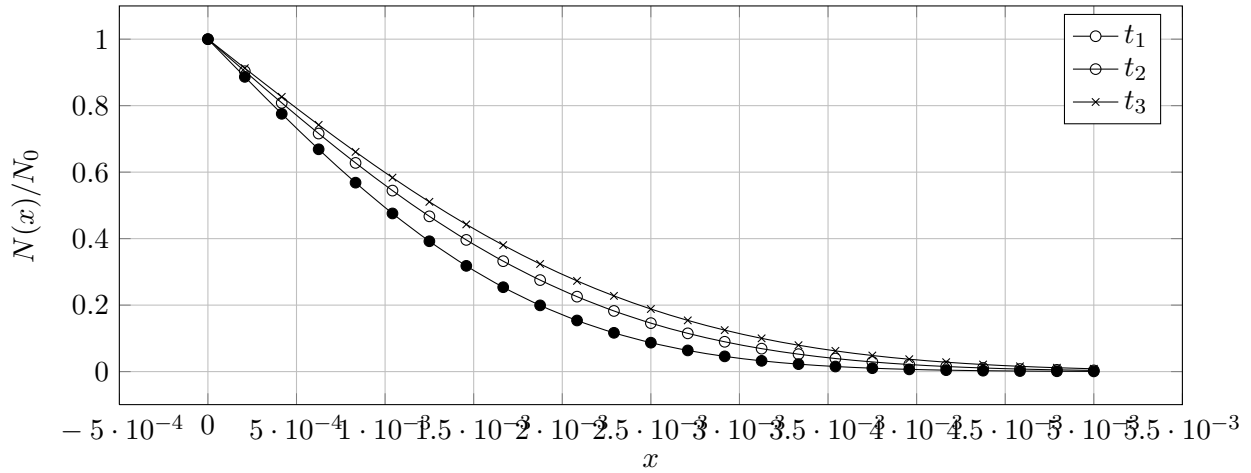
Pradiniai duomenys:

Difuzijos koeficientas (cm^2/s): $D = 1.8 * 10^{-13}$

Proceso trukmės: $t_1 = 13min = 780s$, $t_2 = 18min = 1080s$ ir $t_3 = 22min = 1320s$.

Difuzija iš nesenkančio šaltinio vyksta pirmojoje - priemaišų įterpimo stadijoje. Jos pasiskirstymas randamas, pasitelkus:

$$N(x, t) = N_0 * \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{x\sqrt{Dt}} \right) \quad (19)$$



3.1 pav. Priemaišų pasiskirstymas po priemaišų įterpimo etapo.

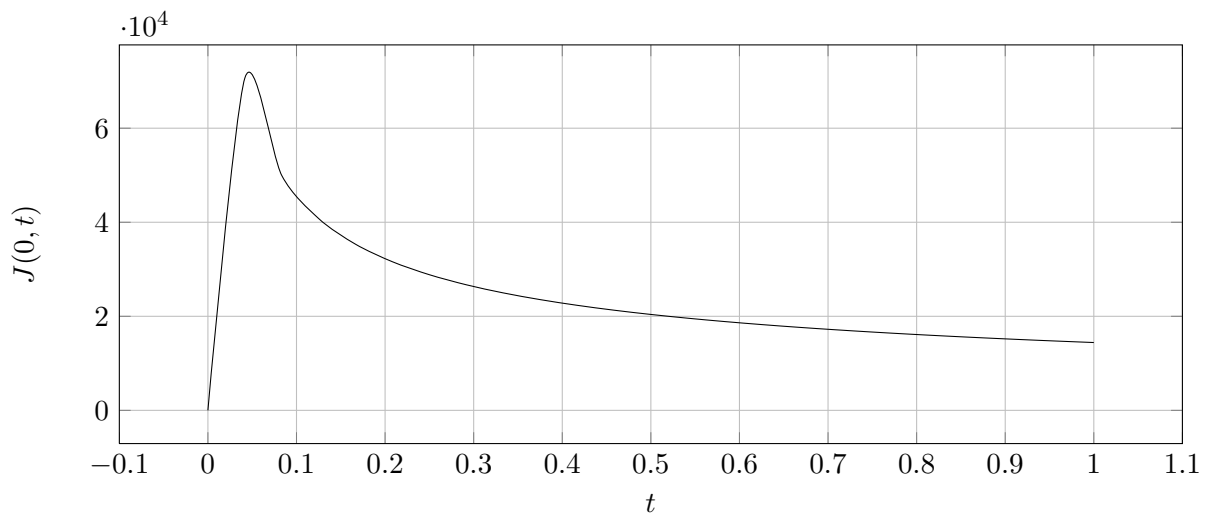
3.2 Apskaičiuoti ir nubraižyti, kaip priemaišų įterpimo etape kinta priemaišos srauto tankis ir legiravimo dozė

Pradiniai duomenys:

Priemaišų koncentracija bandinio paviršiuje ($1/cm^2$): $N_0 = 3 * 10^{20}$

Priemaišos srauto tankis išreiškiamas:

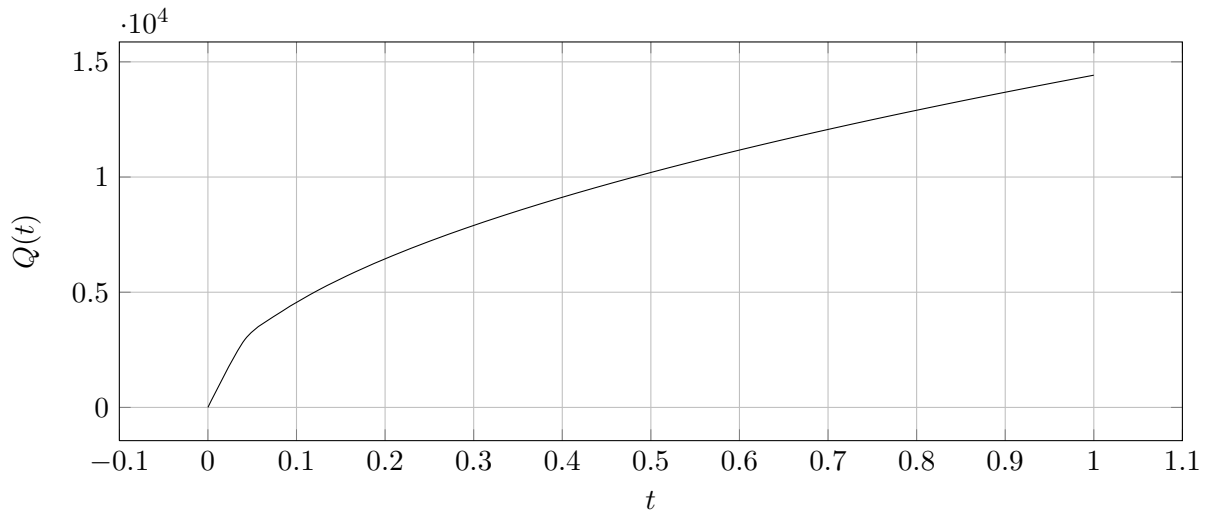
$$J(0, t) = N_0 * \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \quad (20)$$



3.2 pav. Priemaišos srauto tankio pokytis, priemaišų įterpimo etape.

Legiravimo dozė išreiškiamas:

$$Q(t) = 2 * N_0 * \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (21)$$



3.3 pav. Legiravimo dozės pokytis, priemaišų įterpimo etape.

3.3 Apskaičiuoti ir nubraižyti priemaišų pasiskirstymą po priemaišų perskirstymo etapo

Pradiniai duomenys:

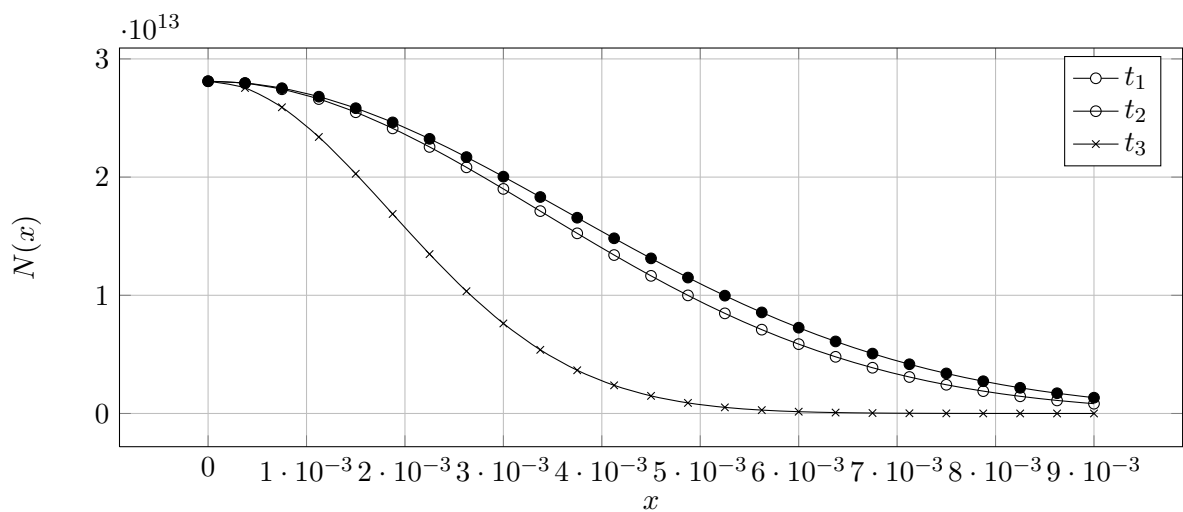
Legiravimo dozė ($1/cm^3$): $Q = 1.4 \cdot 10^{13}$;

Difuzijos koeficientas (cm^2/S): $D = 1.8 \cdot 10^{-13}$;

Proceso trukmės: $t_1 = 81min = 4860s$; $t_2 = 70min = 4200s$; $t_3 = 21min = 1260s$;

Priemaišų perskirstymo stadiją galime apibrėžti:

$$N(x, t') = \frac{Q}{\sqrt{\pi D' t'}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D' t'}\right) \quad (22)$$

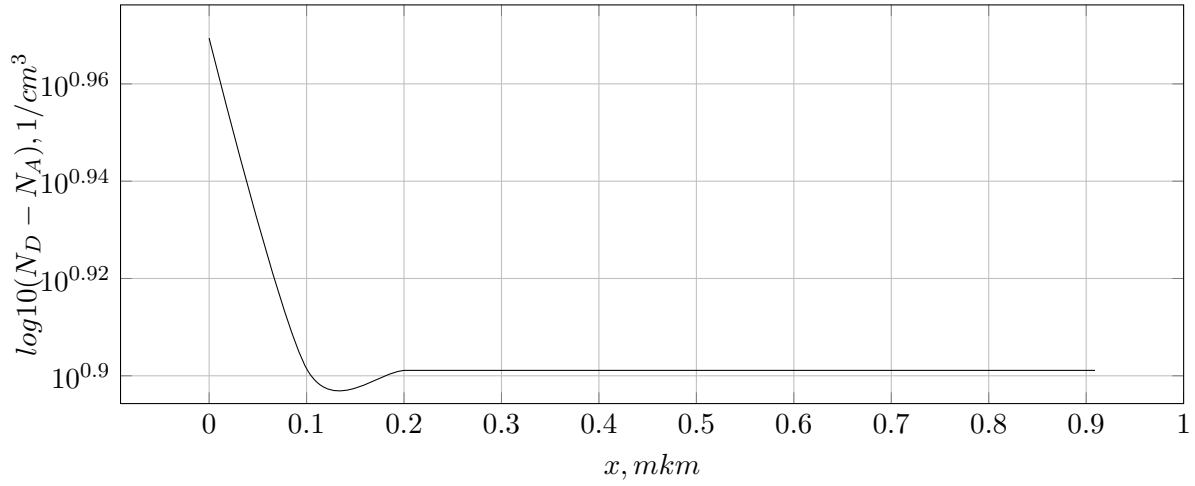


3.4 pav. Priemaišų pasiskirstymas po priemaišų perskirstymo etapo.

3.4 Apskaičiuoti ir nubraižyti priemaišų pasiskirstymą tranzistoriuje, formuojamame dvikartės difuzijos būdu

3.1 lentelė. Priemaišų formavimo dvikartės difuzijos būdu duomenys.

	Įterpimo stadija	Perskirstymo stadija	Įterpimo stadija
Priemaišų koncentracija ($1/cm^3$):	$2.5 \cdot 10^{19}$	-	$1.4 \cdot 10^{21}$
Normali temperatūra ($^{\circ}C$):	1000	1000	1000
Aktyvacijos energija (eV):	2.2	3.7	2.9
Difuzijos koeficientas (cm^2/s):	$1.9 \cdot 10^{-13}$	$1.4 \cdot 10^{-13}$	$3.8 \cdot 10^{-13}$
Stadijos trukmė (min.):	24	77	42
Faktinė temperatūra ($^{\circ}C$):	942	1056	318



3.5 pav. Priemaišų pasiskirstymas tranzistoriuje, formuojame dvikartės difuzijos būdu.

4 Dvipolio tranzistoriaus parametrų skaičiavimas ir ekvivalentinės grandinės schemos sudarymas

Pradiniai duomenys:

Tranzistorius įjungtas pagal bendro emiterio schemą

$I_B = 0.14mA$, $U_{CE} = 8V$, $f_T = 0.9GHz$;

4.1 Rasti dvipolio tranzistoriaus h parametrus

Randame tranzistoriaus įėjimo varžą:

$$h_{11E} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{U_2=0} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \Big|_{U_{KE}=const=U_{KEQ}} \quad (23)$$

$$h_{11E} = \frac{0.162 - 0.147}{0.16 * 10^{-3} - 0.14 * 10^{-3}} = \frac{0.015}{0.02 * 10^{-3}} = 750\Omega$$

Randame grįžtamojo ryšio koeficientą:

$$h_{12E} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{KE}} \Big|_{I_B=const} = \frac{\Delta U_{BE}}{U_{KE3} - U_{KE1}} \Big|_{I_B=I_{BQ}} \quad (24)$$

$$h_{12E} = \frac{0.162 - 0.141}{12 - 4} = \frac{0.021}{8} = 2.6 * 10^{-3}$$

Randame srovės perdavimo koeficientą:

$$h_{21E} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{U_2=0} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \Big|_{U_{KE}=const} = \frac{I_{K3} - I_{K1}}{I_{B3} - I_{B1}} \Big|_{U_{KE}=U_{KEQ}} \quad (25)$$

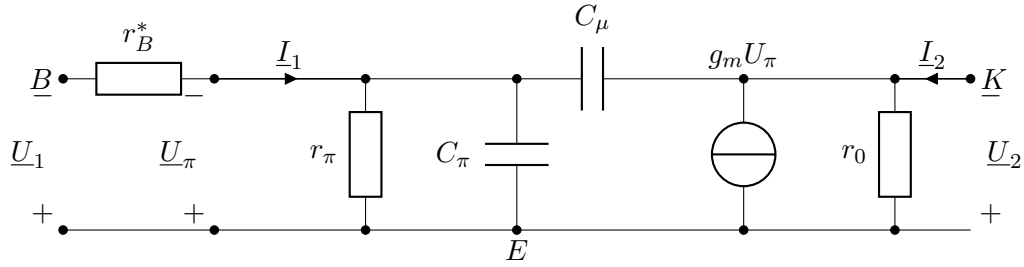
$$h_{21E} = \frac{23 * 10^{-3} - 10.5 * 10^{-3}}{0.18 * 10^{-3} - 0.1 * 10^{-3}} = \frac{14.5 * 10^{-3}}{0.08 * 10^{-3}} = 181.25$$

Randame išėjimo laidumą:

$$h_{22E} = \frac{I_2}{U_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \Big|_{I_B=const=I_{BQ}} \quad (26)$$

$$h_{22E} = \frac{15.9 * 10^{-3} - 16.1 * 10^{-3}}{14 - 12} = \frac{0.2 * 10^{-3}}{2} = 0.1 * 10^{-3}S = 0.1mS;$$

4.2 Sudaryti tranzistoriaus Π pavidalo ekvivalentinės grandinės schemą, rasti jos elementų parametrus



4.1 pav. Π pavidalo ekvivalentinė grandinė.

Randame Π pavidalo grandinės ekvivalentinius parametrus

Apskaičiuojame tranzistoriaus perdavimo charakteristikos statumą g_m , kai $I_{KQ} = 16.1mA$:

$$g_m = 40 * I_{KQ}; \quad (27)$$

$$g_m = 40 * 16.1 * 10^{-3} = 0.644;$$

Apskaičiuojame varžą r_π , $\beta = h_{12E} = 181.25$:

$$r_\pi \cong \frac{\beta}{g_m}; \quad (28)$$

$$r_\pi \cong \frac{181.25}{0.644} = 281.4\Omega;$$

Apskaičiuojame varžą r_0 :

$$r_0 = \frac{100}{I_{KQ}}; \quad (29)$$

$$r_0 = \frac{100}{16.1 * 10^{-3}} = 6211.18 \cong 6.2k\Omega;$$

Apskaičiuojame varžą r_B^* :

$$r_B^* = h_{11E} - r_\pi = 750 - 281.4 = 468.6\Omega; \quad (30)$$

Apskaičiuosime talpą C_π , kai dažnis $f_T = 0.9GHz$:

$$C_\pi = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_\mu; \quad (31)$$

$$C_\pi = \frac{0.644}{2 * 3.14 * 0.9 * 10^9} - C_\mu = 1.14 * 10^{-11} - C_\mu F;$$

4.3 Apskaičiuoti išėjimo srovės kintamąją dedamąją, kai kintamoji įėjimo įtampa yra 115mV

Kintamoji įėjimo įtampa:

$$U_{BE} = 115mV;$$

Išėjimo srovės kintamoji dedamoji grandinėje yra lygti srovės šaltiniui atstojamojoje grandinėje, todėl:

$$I_K = g_m U_\pi; \quad (32)$$

U_π galime rasti

$$U_\pi = \frac{r_\pi}{r_\pi + r_B^*} * U_{BE} = \frac{r_\pi}{h_{11E}} * U_{BE}; \quad (33)$$

Tuomet ankstesnį reiškinį galime pertvarkyti taip:

$$I_K = g_m \frac{r_\pi}{h_{11E}} * U_{BE};$$

Apskaičiuojame:

$$I_K = 0.644 * \frac{281.4}{750} * 115 * 10^{-3} = 27.8mA;$$

4.4 Rasti žemo dažnio įtampos stiprinimo koeficientą, kai apkrovos varža lygi $892\ \Omega$

Apkrovos varža:

$$R_a = 892\ \Omega$$

Įtampos stiprinimo koeficientą randame iš tokios formulės:

$$K_U = \frac{\beta * R_a}{h_{11E}} = \frac{h_{21E} * R_a}{h_{11E}}; \quad (34)$$

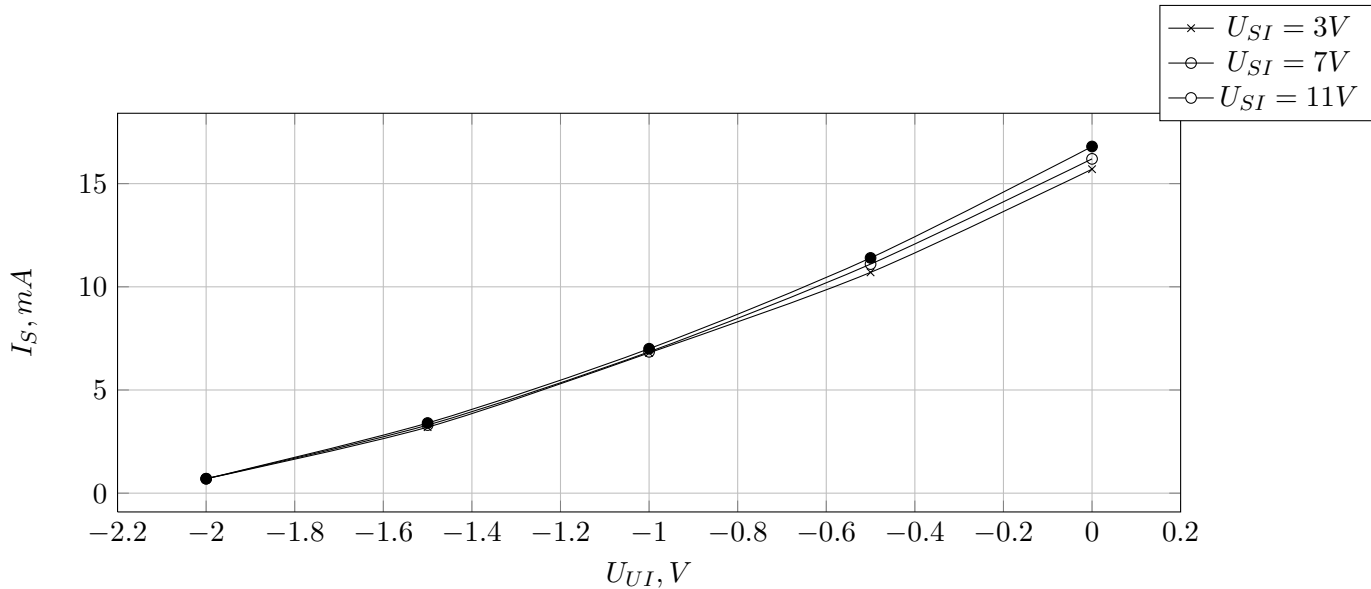
Apskaičiuojame:

$$K_U = \frac{181.25 * 892}{750} = 215.57$$

5 Lauko tranzistoriaus parametrų skaičiavimas ir ekvivalentinės grandinės schemos sudarymas

Dranzistoriaus darbo taškas $U_{UI} = 0.5V$, $U_{SI} = 5V$.

5.1 Nubraižyti lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristikas, kai $U_{DS} = 3, 7, 11V$



5.1 pav. Lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristikos, kai $U_{SI} = 3V, 7V, 11V$.

5.2 Apskaičiuoti lauko tranzistoriaus parametrus nurodytame darbo taške

Tranzistoriaus perdavimo charakteristikos statumą nurodytame darbo taške, randame:

$$g_m = S = \frac{\delta I_S}{\delta U_{UI}} \quad (35)$$

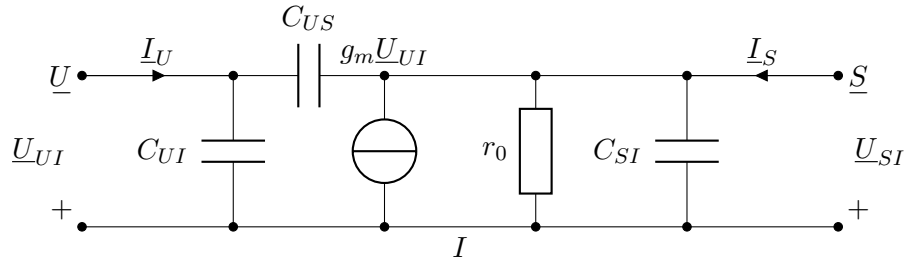
$$g_m = S = \frac{16 * 10^{-3} - 6.8 * 10^{-3}}{1} = 9.2 * 10^{-3} S = 9.2 mS;$$

Tranzistoriaus išėjimo (vidinė) varža:

$$r_0 = \frac{\delta U_{SI}}{\delta I_S} \quad (36)$$

$$r_0 = \frac{6 - 2}{11 * 10^{-3} - 10.2 * 10^{-3}} = 5 k\Omega;$$

5.3 Sudaryti lauko tranzistoriaus ekvivalentinės grandinės schemą



5.2 pav. Lauko tranzistoriaus ekvivalentinės grandinės schema.

5.4 Apskaičiuoti f_T , kai $C_{11} = 9$, $C_{12} = 4$ pF

Dažniui, kuriam esant tranzistorius nustoja stiprinti srovę, randamas pasitelkiant tokią išraišką:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{UI} + C_{US})}; \quad (37)$$

$$C_{US} = C_{12} = 4 \text{ pF};$$

$$C_{11} = C_{UI} + C_{US}; \quad C_{UI} = C_{11} - C_{12} = 9 - 4 = 5 \text{ pF};$$

$$f_T = \frac{9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3.14 \cdot (5 \cdot 10^{-12} + 4 \cdot 10^{-12})} = 1.59 \cdot 10^8 \text{ Hz} = 159 \text{ MHz};$$

5.5 Apskaičiuoti kintamąją išėjimo srovės dedamąją, kai kintamosios įėjimo įtampos amplitudė yra 135 mV

Kintamoji įtampos amplitudė:

$$U_{UI} = 135 \text{ mV};$$

Kintamosios išėjimo srovės dedamoji I_S randama:

$$I_S = g_m U_{UI} \quad (38)$$

Apskaičiuojame:

$$I_S = 9.2 \cdot 10^{-3} \cdot 135 \cdot 10^{-3} = 1.24 \text{ mA};$$

5.6 Rasti žemo dažnio įtampos stiprinimo koeficientą, kai apkrovos varža lygi 621 Ω

Apkrovos varža:

$$R_a = 621 \Omega$$

Žemo dažnio įtampos stiprinimo koeficientas išreiškiamas:

$$K_U = \frac{R_a \cdot I_S}{U_{UI}} \quad (39)$$

Žinant išėjimo srovę ir įėjimo įtampos vertes iš prieš tai buvusios užduoties

$$I_S = 1.24 \text{ mA};$$

$$U_{UI} = 135 \text{ mV};$$

Apskaičiuojame:

$$K_U = \frac{621 \cdot 1.24 \cdot 10^{-3}}{135 \cdot 10^{-3}} = 5.7$$

6 Akustinės elektronikos įtaiso projektavimas

Paviršinių akustinių bangų filtro projektinių skaičiavimų metodika priklauso nuo filtrui keliamų reikalavimų. Aptarsime paprasčiausio filtro, kuriam tinka vienodi neapodizuoti paviršinių akustinių bangų keitikliai, projektinių skaičiavimų metodiką. Projektinių skaičiavimų užduotyje nurodytas centrinis pralaidumo juostos dažnis $f_0 = 100MHz$ ir pralaidumo juostos plotis $\delta F = 8MHz$. Projektavimo skaičiavimo tikslas - nustatyti svarbiausius filtro matmenis ir patikrinti, ar filtro dažninės charakteristikos tenkina jam keliamus reikalavimus. Įvertinus, kad filtre yra du vienodi keitikliai, keitiklio strypų skaičius N randamas pagal formulę:

$$N = \frac{2\alpha f_0}{\delta F}; \quad (40)$$

čia α - koeficientas tarp 0.6 ir 0.8. Paimkime $\alpha = 0.8$.

$$N = \frac{2 * 0.8 * 100 * 10^6}{8 * 10^6} = 20;$$

Siekiant užtikrinti minimalų filtro slopinimą, jo pagrindo medžiaga parenkama tokia, kad optimalus keitiklio strypų skaičius N_{opt} būtų artimas N . Optimalus strypų skaičius randamas pagal formulę:

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{\pi}{k_m^2}} \quad (41)$$

Iš šios lygybės išsivedame mums dominanti elektromechaninio ryšio koeficientą k_m^2 ir gauname:

$$k_m^2 = \frac{\pi}{N^2} = \frac{3.14}{20^2} = 0.00785;$$

Pasižiūrėję į pjezoelektrinių medžiagų parametrų lentelę, galima įsitikinti, kad mums atima medžiaga yra Bismuto germanatas su (001) [110] orientacija.

Iš lentelės sužinome

$$k_m^2 = 0.0085;$$

PAB greitį:

$$v_s = 1.624km/s;$$

Santykinę dielektrinę skvarbą:

$$\varepsilon_T = 43.6;$$

Panaudoję kompiuterinę programą *pab.M* apskaičiuojame reikalingus parametrus.

Gauname, kas optimalus strypų skaičius N_0 yra

$$N_0 = 19.225;$$

Pasirinkę keitiklio strypų skaičių $N = 19$, gauname išderinimo koeficientą P :

$$P = 1.0238;$$

Keitiklio strypų žingsnį H :

$$H = 0.00812mm;$$

Strypo plotis D :

$$D = 0.00406mm;$$

Keitiklio ilgis ALK :

$$ALK = 0.15022mm;$$

Minimali keitiklio apertūra W_{min} (mm):

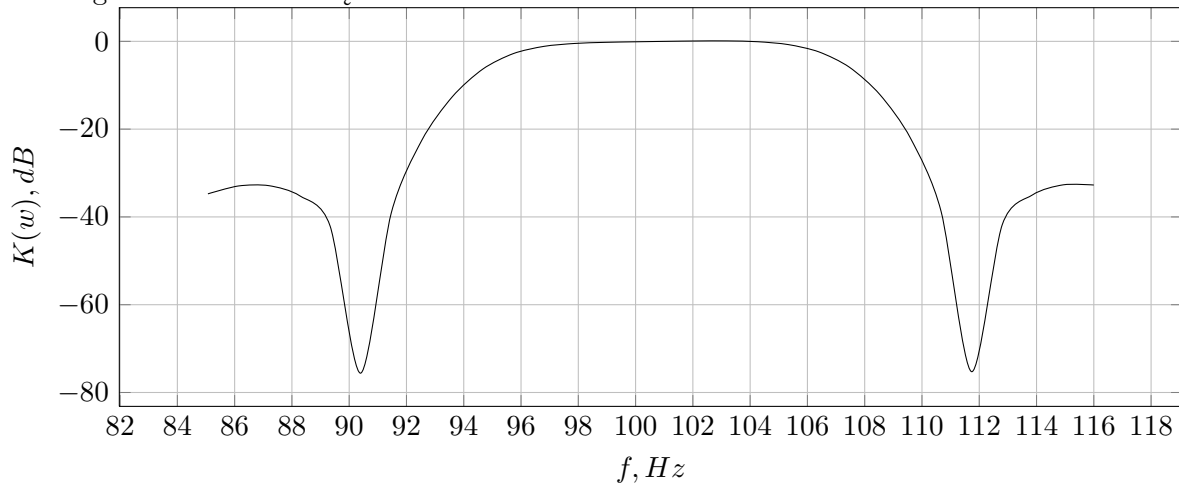
$$W_{min} = 0.40299;$$

Pasirinkę apertūros ilgį $W = 2mm$ ir nuo garsolaidžio galo pasirinkę atstumą $L = 7mm$, gauname garsolaidžio plotį: $16.016mm$;

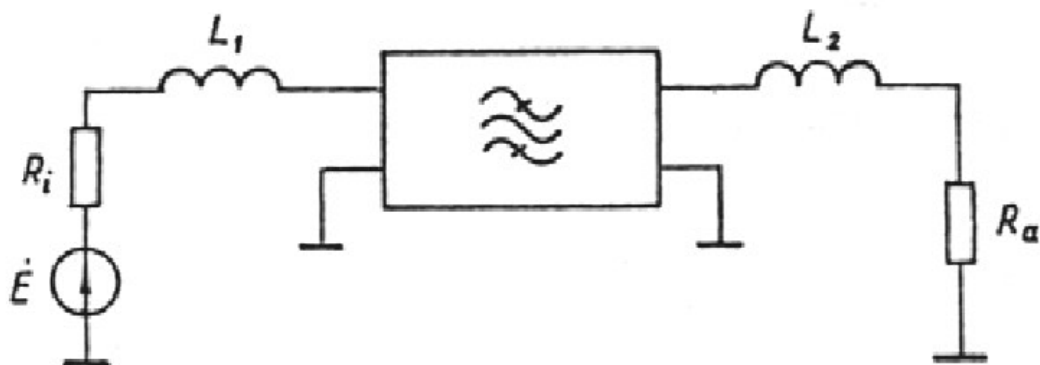
Garsolaidžio ilgis: $L_k = 24.3mm$;

Atstumas tarp keitiklių: 10mm ;
 Slopinimas: 6.0218dB ;
 Atspindančios bangos lygis: 12.247dB ;
 Statinė keitiklio talpa $C_0 = 7.4995\text{pF}$;
 Spinduliavimo varža $R_0 = 21.819\Omega$;
 Suderinimo induktyvumas $L = 0.33776\text{mH}$;
 Apkrovos varža $R = 22.339\Omega$;

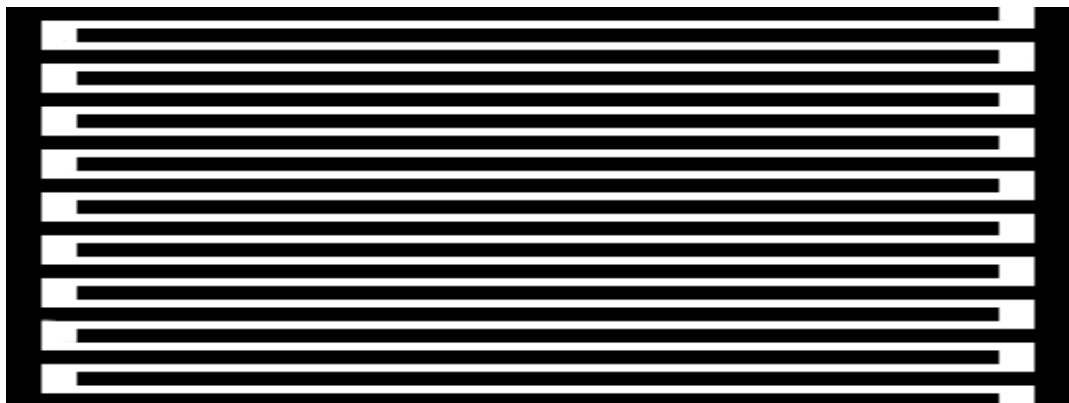
Programa nubaižė tokią DACH:



6.1 pav. Akustinio elektronikos filtro DACH.



6.2 pav. Akustinio elektronikos įtaiso jungimo schema.



6.2 pav. Akustinio elektronikos įtaiso keitiklio eskizas.

Aptarta projektinių skaičiavimų metodika pagrįsta paprasčiausiais keitiklių ir filtrų modeliais ir gali būti panaudojama orientaciniams skaičiavimams atlikti eskizinio projektavimo etape. Specialioje literatūroje galima rasti tobulesnius paviršinių akustinių bangų įtaisų modelius.

7 Išvados

Kursinio darbo metu ištyrėme terminės difuzijos procesą, kuris taikomas antrame silicion integrinių grandynų gamybos technologiniam procese, sudarėme tranzistorių ekvivalentinių grandinių schemas ir apskaičiavome jų parametrus. Suprojektavome akustoelektronikos įtaisą.

Ištyrę priemaišų pasiskirstymą po priemaišų įterpimo etapo iš grafiko galima pastebėti, jog, didinant proceso trukmę, galima padidinti priemaišos koncentraciją netoli bandinio paviršiaus. Iš priemaišos srauto tankio pokyčio, priemaišų įterpimo etape grafiko galima pamatyti, kad pradiniu laiko momentu priemaišos srauto tankio pokytis kinta tiesiškai priemaišos srauto tankio pokyčio didėjimo linkme ir didėjant laikui jis pradeda mažėti. Iš legiravimo dozės pokyčio, priemaišų įterpimo etape, grafiko galima pasakyti, jog kintant laikui legiravimo dozės pokytis didėja beveik tiesiškai didėjimo linkme. Nagrinėdami priemaišų pasiskirstymą po priemaišų perskirstymo etapo, didinant proceso trukmės laiką, galima sumažinti priemaišos koncentraciją netoli paviršiaus staigiau. Iš priemaišos pasiskirstymas tranzistoriuje, formuojamas dvikartės difuzijos būdu, grafiko galime pasakyti, kad netoli bandinio paviršiaus, priemaišos koncentracija kinta staigiau mažėjimo kryptimi, paskui nežymiai pakyla ir likusio bandinio dalyje lieka pastovi.

Tirdami dvipolio tranzistorių, apskaičiavimo jo parametrus, sudarėme jo ekvivalentinę II pavidalo grandinę. Apskaičiavę h parametrus, galime pamatyti, kad dvipolio tranzistoriaus įėjimo varža yra gan didelė (750Ω), grįžtamojo ryšio koeficientas yra labai mažas (šiuolaikiniuose tranzistoriuose jo visai nepaisoma), srovės perdavimo koeficientas yra 181.25, išėjimo laidumas yra $0.1mS$ arba išėjimo varža $10k\Omega$. Pasirinkę darbo tašką $K_{KQ} = 16.1mA$ apskaičiavome tranzistoriaus perdavimo charakteristikos statumą g_m , kuris lygus 0.644. Žinodami g_m ir β , kuri lygi bendro emiterio jungimo schemeje yra h_{12E} , apskaičiavome r_π , r_0 ir r_B^* . Žinodami vienetinio srovės perdavimo koeficiento dažnį, apskaičiavome tranzistoriaus parazitines talpas C_π .

Lauko tranzistoriaus perdavimo charakteristiką galima nubraižyti iš lauko tranzistoriaus išėjimo charakteristikos, pasirenkant U_{SI} kaip konstantą ir keisdami U_{UI} , žiūrime kaip kinta I_S . Apskaičiavome lauko tranzistoriaus darbo taške $U_{UI} = 0.5V$, $U_{SI} = 5V$ perdavimo charakteristikos statumą, kuris lygūs santakos srovės ir užtūros-ištakos įtampos pokyčiui, ir tranzistoriaus išėjimo (vidinę) varžą, kuri lygi santakos-ištakos įtampos ir santakos srovės pokyčiui. Taip pat apskaičiavome tranzistoriaus dažnį, kuriam esant, tranzistorius nustoja stiprinti srovę $f_T = 159MHz$.

Projektuodami akustinį elektronikos įtaisą, pasitelkėme kompiuterinę programą, kuri mums pateikė tikslūs akustinio elektronikos įtaisų parametrus, nubraižė įtaiso DACH. Iš skaičiavimų matome, kad akustoelektronikos įtaisas yra labai mažų gabaritų, tik 0.15 mm. Teoriniai filtrai nuo realių dažniausiai skiriasi dėl to, kad teoriniuose skaičiavimuose nebuvo atsižvelgta į aplinkos įtaką filtrui.

8 Literatūra

- S.Štaras. Puslaidininkinės ir funkcinės Elektronikos įtaisai. Vilnius, "Technika", 2005, 468 p.
- S.Štaras. Elektronikos pagindai. Akustoelektronika. Vilnius, "TECHNIKA", 1994, 56 p.
- Орлов В.С., Бондаренко В.С. "Фильтры на поверхностных акустических волнах", 1984 м.