

T 191 AUKŠTŲJŲ DAŽNIŲ TECHNOLOGIJOS, MIKROBANGOS

Elektromagnetinė magnetoplazminė banga daugiasluoksniame kelių puslaidininkių rezonatoriuje

R. Gaivenis

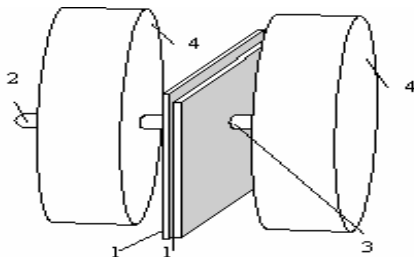
Programinės įrangos katedra, Vilniaus kolegija, J. Jasinskio g. 15, LT- 01111 Vilnius, Lietuva, tel +370 5 2497469, faks. 2497909, el. paštas rimasg@viko.lt

L. Laurinavičius, Z. Jankauskas

Elektrotechnikos katedra, VGTU, Saulėtekio al.11, LT-10223 Vilnius, Lietuva

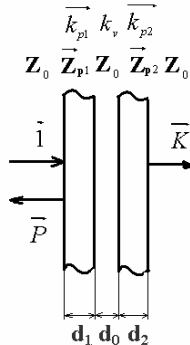
Įvadas

Elektromagnetinių magnetoplazminių bangų matmenų rezonanso reiškinys puslaidininkiniame rezonatoriuje naudojamas mikrobanginiuose atsiejimo ir valdymo įtaisuose [1,2]. Paprastai rezonatoriai gaminami iš A₃B₅ grupės puslaidininkio, kurio krūvininkai kambario temperatūroje yra gana judrūs ($\mu > 4 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). Atskirais atvejais parenkant įtaisų parametrus pravartu naudoti rezonatorių, sudarytą iš kelių didžiaisiais paviršiais suglaustų puslaidininkio monokristalo plokštelių. Toks rezonatorius parodytas 1 paveiksle.



1 pav. Kelių puslaidininkių rezonatorius: 1 – puslaidininkio plokštelės; 2 ir 3 – elektromagnetinių magnetoplazminių bangų žadinimo ir indukavimo zondai; 4 – nuolatinio magneto poliai

2 pav. pavaizduotas šio rezonatoriaus fizikinis modelis, sudarytas iš dviejų d_1 ir d_2 storio puslaidininkinių sluoksnių, atskirtų oro tarpeliu, kurio storis d_0 .

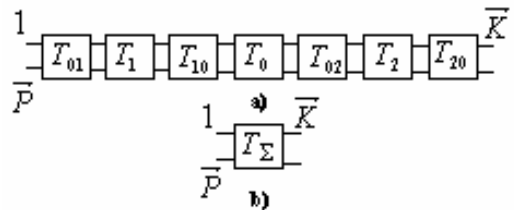


2 pav. Sluoksniuota struktūra

Statmenai plokštelėms lygiagrečiai su nuolatinio išorinio magnetiniu lauku krinta vienetinė apskritiminė poliarizacijos elektromagnetinė magnetoplazminė banga.

Sistemos analizė

Tokią struktūrą galima laikyti pakopiniu keturpolių jungimu, pavaizduotu 3 pav., a.



3 pav. Sandūrų keturpoliai (a), atstojamasis keturpolis (b)

Atstojamojo keturpolio 3 pav., b, perdavimo matrica T_Σ apskaičiuojama dauginant septynių keturpolių perdavimo matricas:

$$\|T_\Sigma\| = \|T_{01}\| \times \|T_1\| \times \|T_{10}\| \times \|T_0\| \times \|T_{02}\| \times \|T_2\| \times \|T_{20}\|; \quad (1)$$

čia $\|T_{01}\|$ ir $\|T_{02}\|$ – oro ir puslaidininkio sandūrų perdavimo matricos, kurių pavidalas

$$\frac{1}{2\sqrt{Z_p Z_0}} \begin{vmatrix} Z_p + Z_0 & Z_p - Z_0 \\ Z_p - Z_0 & Z_p + Z_0 \end{vmatrix}; \quad (2)$$

$\|T_{10}\|$ ir $\|T_{20}\|$ – puslaidininkio ir oro sandūrų perdavimo matricos, kurių pavidalas

$$\frac{1}{2\sqrt{Z_0 Z_p}} \begin{vmatrix} Z_0 + Z_p & Z_0 - Z_p \\ Z_0 - Z_p & Z_0 + Z_p \end{vmatrix}; \quad (3)$$

čia Z_p – puslaidininkių, kurių storiai d_1 ir d_2 , kompleksinės banginės varžos; $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ – oro tarpelio banginė varža; ϵ_0 ir μ_0 – vakuumo dielektrinė ir magnetinė skvarba.

$\|T_1\|$ ir $\|T_2\|$ – keturpolių, aprašančių bangų sklaidimą puslaidininkių sluoksniuose, kurių storai d_1 ir d_2 , o $\|T_0\|$ – keturpolio, aprašančio bangų sklaidimą oro tarpelyje, perdavimo matricos

$$\begin{pmatrix} e^{jkd} & 0 \\ 0 & e^{-jkd} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

čia k – puslaidininkių kompleksiniai banginiai skaičiai \vec{k}_p arba oro banginis skaičius $k_v = \omega/c$; ω – kampinis dažnis; c – šviesos greitis.

Puslaidininkio sluoksnio kompleksinis banginis skaičius randamas iš išraiškos [1]

$$\vec{k}_p^2 \pm = \omega\mu_0 n \mu \left(\frac{-j \pm \mu B}{1 + \mu^2 B^2} \right); \quad (5)$$

čia e – elektrono krūvis; n – puslaidininkio elektronų koncentracija; μ – elektronų judrumas; B – magnetinio lauko indukcija.

Puslaidininkio sluoksnio kompleksinė banginė varža Z_p , sklindant apskritiminės poliarizacijos elektromagnetinei bangai [2,3],

$$\vec{Z}_p \pm = R \pm + jX \pm = (\omega\mu_0 \varepsilon_L / 2ne\mu)^{1/2} \{ [(\mu^2 B^2 + 1)^{1/2} \pm \mu B]^{1/2} + j [(\mu^2 B^2 + 1)^{1/2} \mp \mu B]^{1/2} \}; \quad (6)$$

čia ε_L – puslaidininkio gardelės dielektrinė skvarba. (5), (6) išraiškose pliusas atitinka dešininės, o minusas – kairinės apskritiminės poliarizacijos elektromagnetines bangas.

Atstojamojo keturpolio perdavimo matrica

$$\|T_\Sigma\| = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Atstojamojo keturpolio kompleksinis perdavimo koeficientas

$$\vec{K} = K e^{j\phi_K} = \frac{1}{t_{11}}, \quad (8)$$

atspindžio koeficientas

$$\vec{P} = P e^{j\phi_P} = \frac{t_{21}}{t_{11}}; \quad (9)$$

čia K ir P – perdavimo ir atspindžio koeficientų moduliai, o ϕ_K ir ϕ_P – jų fazės.

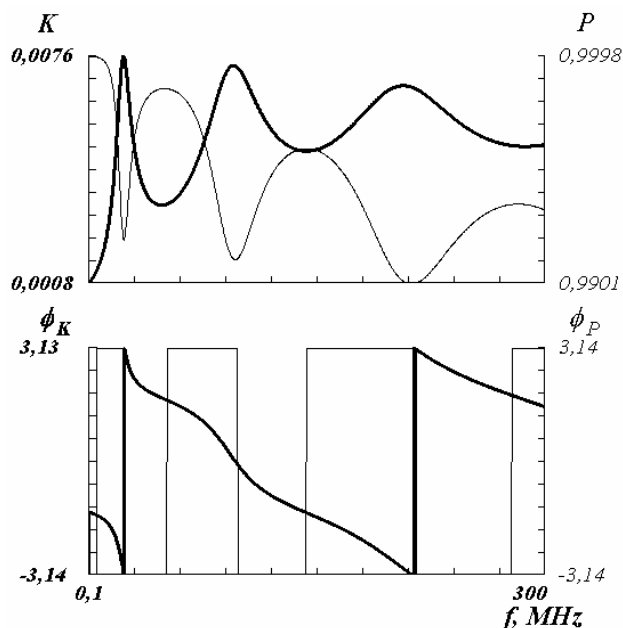
Skaičiavimai atlikti dauginant keturpolių su kompleksiniais koeficientais perdavimo matricas. Sudaryta skaičiavimo asmeniniu kompiuteriu programa, parašyta C++ programavimo kalba. Programai sudaryti panaudota Borland C++ Builder 5 vizualiojo programavimo priemonė.

Skaičiavimai atliekami atskirai dešininės ir kairinės apskritiminės poliarizacijos magnetoplazminėms bangoms.

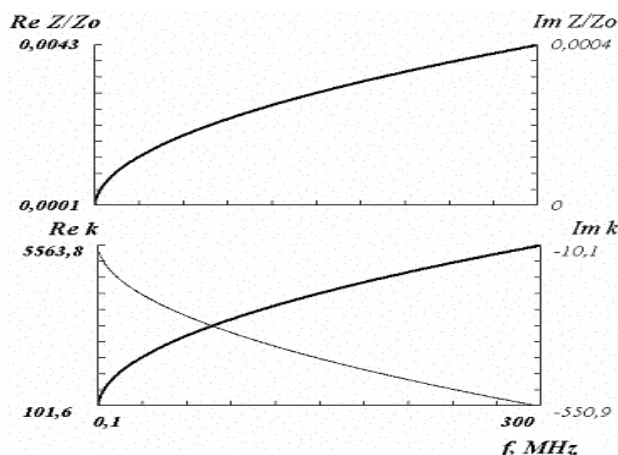
Skaičiavimo rezultatai

Skaičiavimuose panaudoti A_3B_5 grupės puslaidininkio InSb parametrai: elektronų koncentracija

$n=0,84 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, elektronų judrumas $\mu=5 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, dielektrinė skvarba $\varepsilon_L = 15$. Magnetinio lauko indukcija $B=1 \text{ T}$. Sluoksniuotos puslaidininkių struktūros parametrai: puslaidininkių plokštelių storai $d_1=d_2=1 \text{ mm}$, oro tarpelio $d_0=0,1 \text{ mm}$. 4 pav., a, d, pateiktos apskaičiuotos sluoksniuotos struktūros perdavimo ir atspindžio koeficientų modulių K ir P bei fazių ϕ_K ir ϕ_P dažninės charakteristikos, K ir ϕ_K – storos, P ir ϕ_P – plonos linijos. 4 pav., b, c, parodytos puslaidininkio banginės varžos (6) santykio su oro bangine varža realios $Re Z/Z_0$ bei menamos $Im Z/Z_0$ ir puslaidininkio banginio skaičiaus k_p (5) realios $Re k$ bei menamos $Im k$ dalių dažninės priklausomybės (4 pav., a, b, – dešininei, o 4 pav., c, d, – kairinei bangoms).

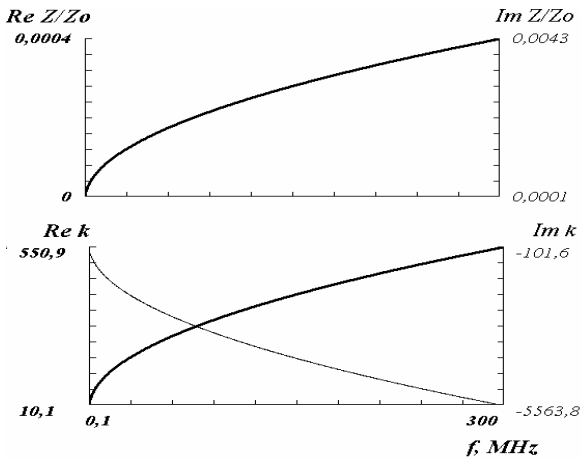


4 pav., a. Dešininės bangos dažninės charakteristikos

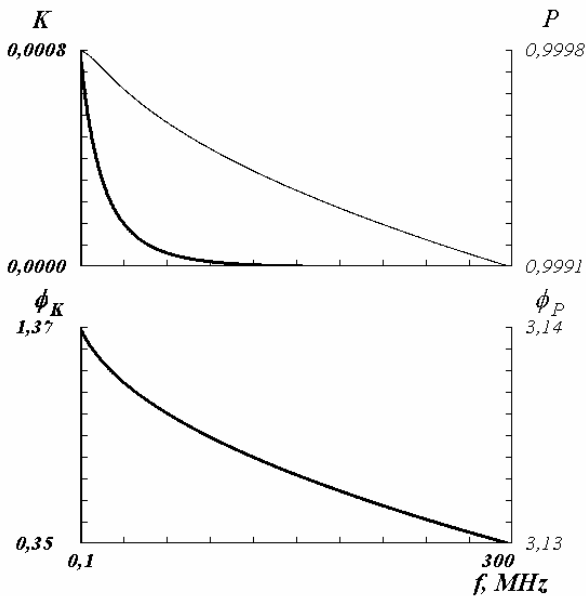


4 pav., b. Dešininės bangos dažninės priklausomybės

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad, kai $\mu B = 5$, kas lemia didelį daugkartinių atspindžių nuo puslaidininkio ir oro sandūros slopinimą, dešininės bangos perdavimo koeficientas eile didesnis už kairinės. Tai paaiškinama didesniu kairinės bangos slopinimu, salygojamu $Im k$. Taip pat visa eile mažesnis yra kairinės bangos suvėlinimas, salygojamas $Re k$. Dėl šių priežasčių kairinės bangos dažninės charakteristikos gautos be ekstremumų. Todėl toliau nagrinėjama tik dešininė banga.



4 pav., c. Kairinės bangos dažninės priklausomybės



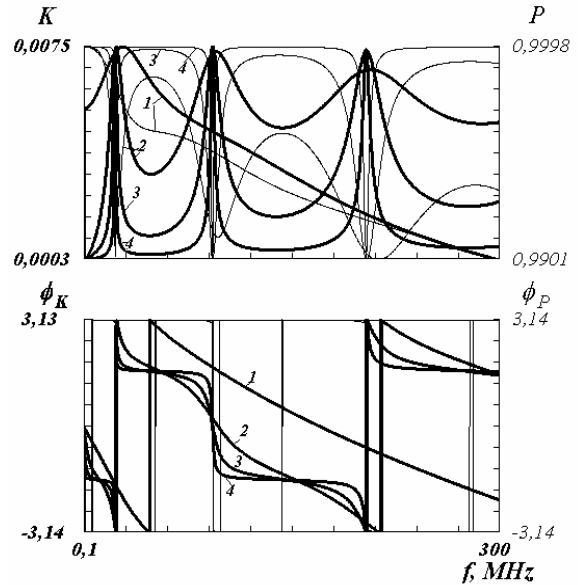
4 pav., d. Kairinės bangos dažninės charakteristikos

5 – 9 pav. pateiktos apskaičiuotos sluoksniuotos struktūros (K ir ϕ_K – storos bei P ir ϕ_P – plonos linijos) dažninės charakteristikos, keičiant įvairius puslaidininkinių plokštelių fizikinius ir geometrinius parametrus.

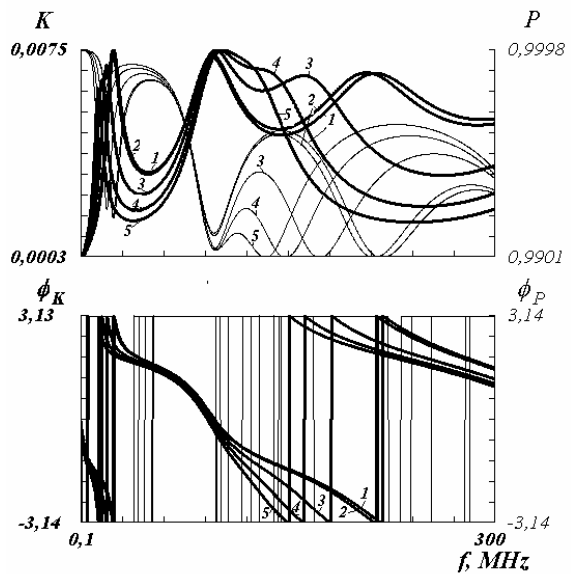
Kaip matyti iš 5 pav., mažėjant bangų slopinimui (didėjant μB), perdavimo ir atspindžio koeficientų dažnių charakteristikų priklausomybių ekstremumai aštrėja ir gerokai didėja. Kai $\mu = 5 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, kas būdinga InSb, ir kai $B = 1 \text{ T}$, ekstremumai labai sumažėja. Tai galima paaiškinti dideliu daugkartinių atspindžių slopinimu, nors tiesiogiai per siauras puslaidininkio plokšteles perėjusi banga slopinama mažai. K maksimumai ir P minimumai gaunami esant $(d_1 + d_2) \cdot Re k +$ vertėms, kartotinėms π . Dėl parabolinės $Re k +$ priklausomybės 4 pav., b, tai atitinka dažnius 23 MHz, 95 MHz, 200 MHz, 370 MHz, ... ϕ_K ir ϕ_P vertės, esant šiems dažniams, kartotinės π . Perdavimo koeficiento maksimumas gautas labai mažas – $K_m = 0,0075$, vienos eilės su Z/Z_0 . Kaip matyti iš 4 pav., b, ši vertė, kai $f = 23 \text{ MHz}$, lygi 0,0012.

6 pav. parodyta oro tarpelio tarp puslaidininkinių plokštelių įtaka dažninėms charakteristikoms. Matyti, kad mažas oro tarpelis beveik neturi įtakos. Tai galima paaiškinti tuo, kad daugkartiniai atspindžiai nuo pirmojo

puslaidininkio ir oro bei oro ir antrojo puslaidininkio sandūrų yra priešingų fazių. Kadangi dėl didelio sklidimo greičio ore bangos suvėlinimas būna labai mažas, tai abiejų atspindžių suma beveik lygi nuliui. Kai oro tarpelis yra vienos eilės su puslaidininkinių plokštelių storiu, dažninės charakteristikos labai pakinta, trečias K ekstremumas pastebimai nuslenka žemesniųjų dažnių pusėn ir beveik susilieja su antruoju ekstremumu (kreivė 5).



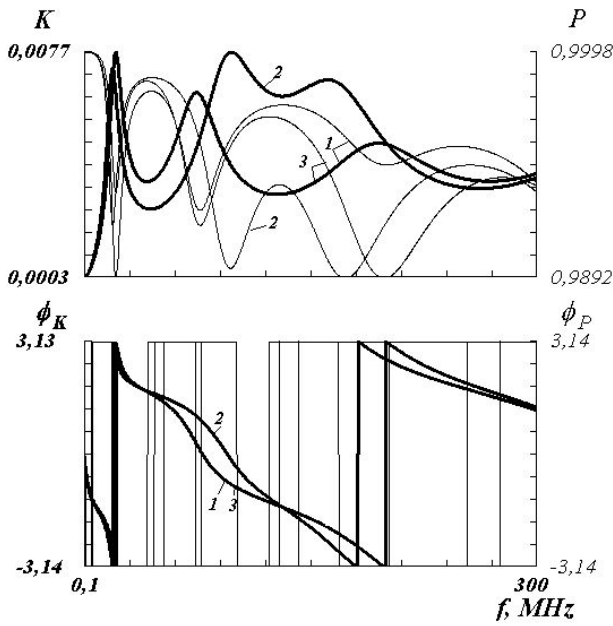
5 pav. Dažninės charakteristikos, kintant puslaidininkinių elektronų judrumui: 1 – $\mu = 1$, $K_m = 0,0019$, 2 – $\mu = 5$, $K_m = 0,0075$, 3 – $\mu = 20$, $K_m = 0,0296$, 4 – $\mu = 100$, $K_m = 0,1325$



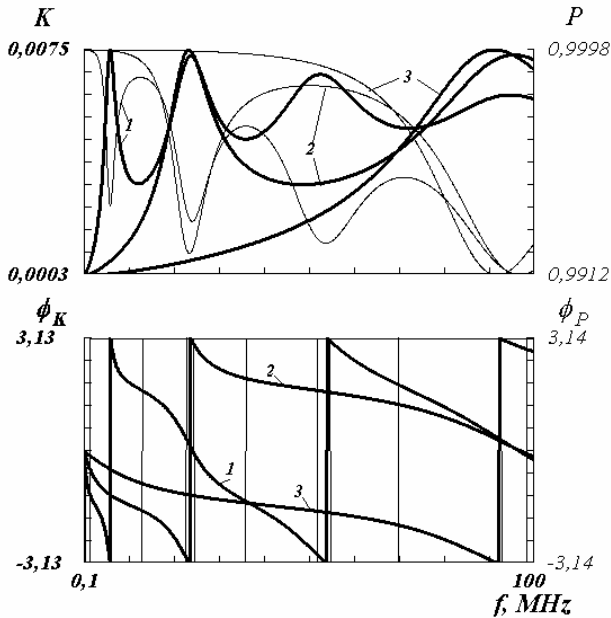
6 pav. Dažninės charakteristikos, kintant oro tarpeliui tarp puslaidininkinių plokštelių: 1 – $d_0 = 0$, 2 – $d_0 = 0,1 \text{ mm}$, 3 – $d_0 = 1 \text{ mm}$, 4 – $d_0 = 2 \text{ mm}$, 5 – $d_0 = 3 \text{ mm}$

7 pav. parodyta, kad, kai oro tarpelis didelis, dažninės charakteristikos, esant skirtingiems abiejų plokštelių storiams, gerokai pakinta, nors jų storių suma išlieka pastovi.

8 pav. parodyta, kaip kinta dažninės charakteristikos, kintant puslaidininkinių plokštelių storiui. Matyti, kad, padidinus plotį du kartus, ekstremumų dažniai sumažėja keturis kartus, sumažėja ir K_m .



7 pav. Dažninės charakteristikos, kai $d_0 = 1$ mm, kintant puslaidininkių plokštelių storiui: 1 – $d_1 = 0,5$ mm, $d_2 = 1,5$ mm, 2 – $d_1 = d_2 = 1$ mm, 3 – $d_1 = 1,5$ mm, $d_2 = 0,5$ mm

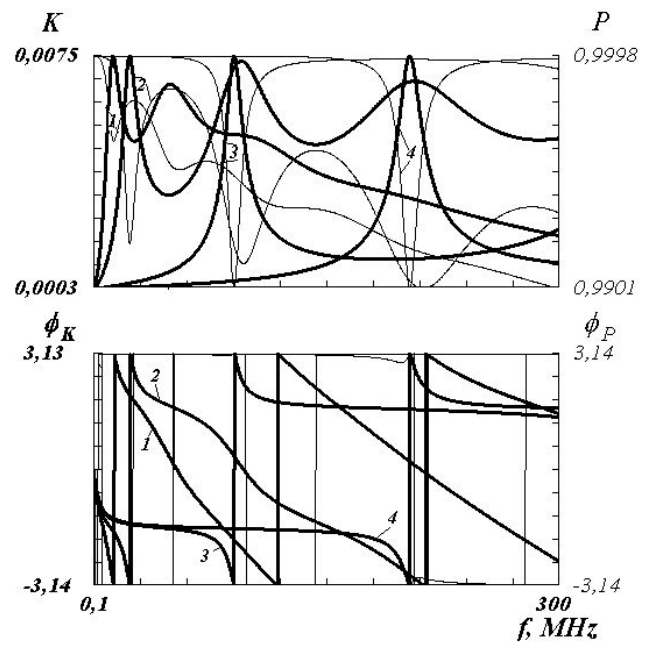


8 pav. Dažninės charakteristikos, kintant puslaidininkių plokštelių storiui: 1 – $d_1 = d_2 = 2$ mm, $K_m = 0,0038$, 2 – $d_1 = d_2 = 1$ mm, $K_m = 0,0075$, 3 – $d_1 = d_2 = 0,5$ mm, $K_m = 0,01$

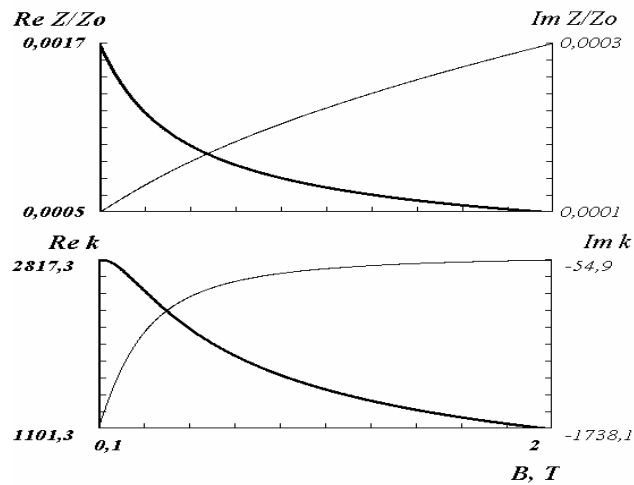
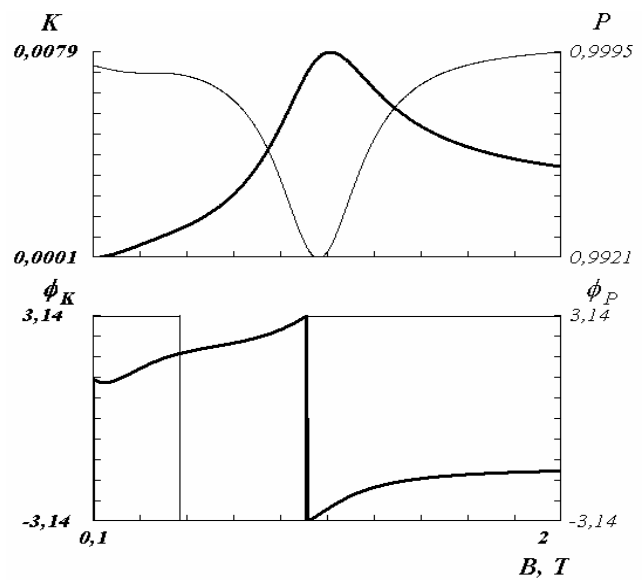
Kaip matyti iš 9 pav., didėjant magnetinio lauko indukcijai B , tiek pat kartų padidėja ekstremumų dažniai.

Skaičiavimais buvo nustatyta abiejų puslaidininkių plokštelių elektronų koncentracijų skirtumo įtaka. Dėl koncentracijų skirtumo pirmas ekstremumas pasistumia aukštesniųjų dažnių pusėn. Buvo nustatyta, kad kitų fizikinių puslaidininkių parametrų μ ir ϵ_L skirtumai visiškai neturi įtakos pobūdžiui.

10 pav. pateiktos apskaičiuotos sluoksniuotos struktūros K ir P bei ϕ_K ir ϕ_P priklausomybės nuo magnetinio lauko indukcijos B . Ten pat parodytos $Re Z/Z_0$ ir $Im Z/Z_0$ bei $Re k$ ir $Im k$ priklausomybės nuo B , esant dešininei bangai.



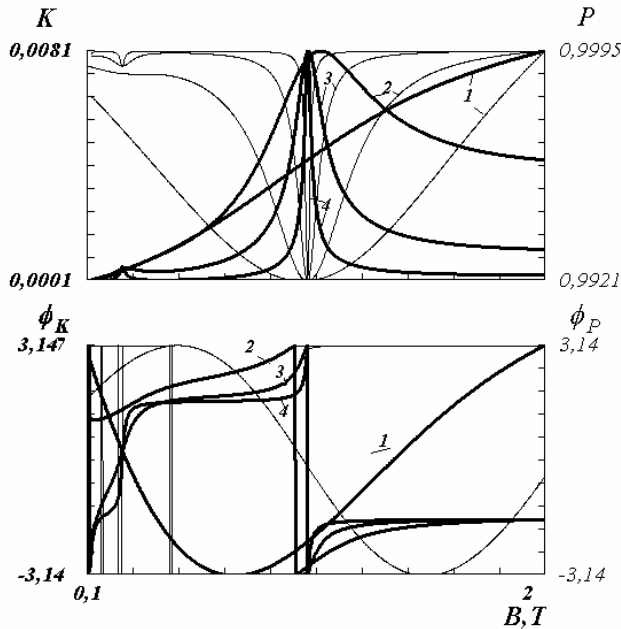
9 pav. Dažninės charakteristikos, kintant magnetiniam laukui: 1 – $B = 0,5$ T, $K_m = 0,0019$, 2 – $B = 1$ T, $K_m = 0,0075$, 3 – $B = 4$ T, $K_m = 0,1076$, 4 – $B = 9$ T, $K_m = 0,370$



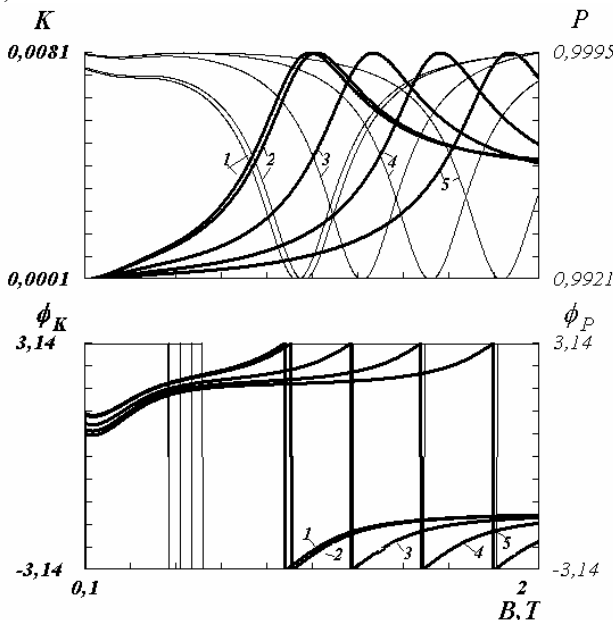
10 pav. K ir P , ϕ_K ir ϕ_P , $Re Z/Z_0$ ir $Im Z/Z_0$, $Re k$ ir $Im k$ priklausomybės nuo B

11-14 pav. pateiktos apskaičiuotos sluoksniuotos struktūros (K ir ϕ_K – storos bei P ir ϕ_P – plonos linijos) priklausomybės nuo magnetinio lauko indukcijos B , kai dažnis $f = 23$ MHz, keičiant įvairius puslaidininkinių plokštelių fizikinius ir geometrinis parametrus.

11 pav. parodyta, kaip kinta priklausomybės kintant slopinimui. Matyti, kad yra vienas ryškus ekstremumas, atitinkantis pagrindinį rezonansą. Kiti ekstremumai, gauti esant mažesnėms B vertėms, gerokai mažesni. Tai paaiškinama tuo, kad, didėjant B , slopinimas mažėja.



11 pav. K ir P , ϕ_K ir ϕ_P priklausomybės nuo B , kintant puslaidininkinių elektronų judrumui: 1 – $\mu = 1$, $K_m = 0,0035$, 2 – $\mu = 5$, $K_m = 0,0081$, 3 – $\mu = 20$, $K_m = 0,0303$, 4 – $\mu = 100$, $K_m = 0,1347$



12 pav. K ir P , ϕ_K ir ϕ_P priklausomybės nuo B , kintant oro tarpeliui tarp puslaidininkinių plokštelių: 1 – $d_0 = 0$, 2 – $d_0 = 0,1$ mm, 3 – $d_0 = 1$ mm, 4 – $d_0 = 2$ mm, 5 – $d_0 = 3$ mm

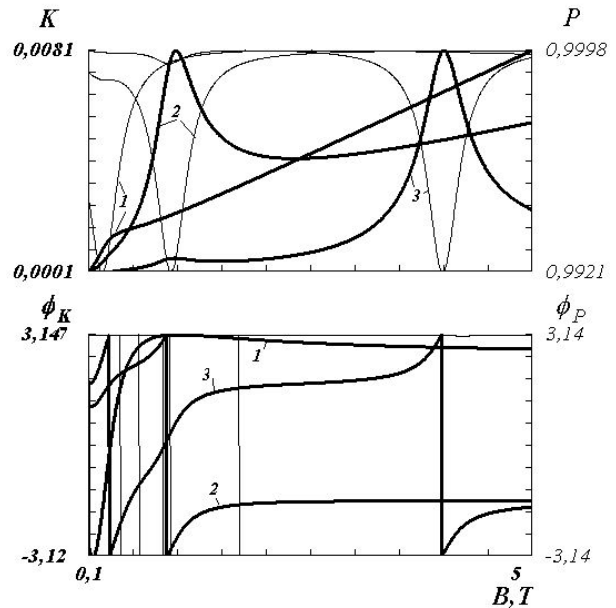
12 pav. parodytas oro tarpelio poveikis priklausomybėms. Matyti, kad kai oro tarpelis yra vienos

eilės su plokštelių storiu, ekstremumas gerokai pasislenka didesnių B verčių pusėn.

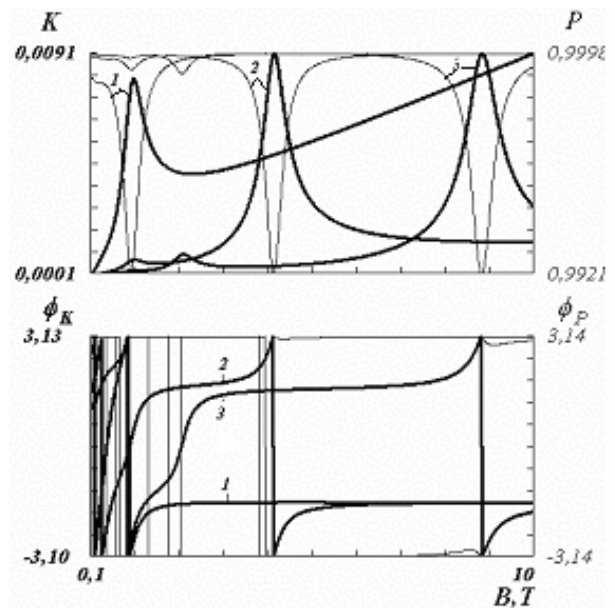
13 pav. parodyta plokštelių storių įtaka. Didėjant storiui, pagrindinis ekstremumas padidėja ir pasislenka didesnių B verčių pusėn.

14 pav. pateiktos priklausomybės, apskaičiuotos esant skirtingiems dažniams. Esant bet kuriam dažniui, gaunamas ekstremumas. Didėjant dažniui jis gaunamas didesnis esant didesnėms B vertėms.

Buvo nustatyta, kad elektronų koncentracijų skirtumas abiejose puslaidininkinių plokštelėse nustumia pirmą pagrindinį ekstremumą link mažesnių B verčių.



13 pav. K ir P , ϕ_K ir ϕ_P priklausomybės nuo B , kintant puslaidininkinių plokštelių storiui: 1 – $d_1 = d_2 = 0,5$ mm, $K_m = 0,0083$, 2 – $d_1 = d_2 = 1$ mm, $K_m = 0,0081$ 3 – $d_1 = d_2 = 2$ mm, $K_m = 0,0578$



14 pav. K ir P , ϕ_K ir ϕ_P priklausomybės nuo B , esant skirtingiems dažniams: 1 – $f = 23$ MHz, $K_m = 0,0081$, 2 – $f = 95$ MHz, $K_m = 0,1176$, 3 – $f = 200$ MHz, $K_m = 0,3729$

Išvados

1. Sudaryta metodika apskritiminės poliarizacijos elektromagnetinių bangų perdavimo K ir atspindžio P koeficientams sluoksniuotoje dviejų puslaidininkių, atskirtų oro tarpelio, struktūroje apskaičiuoti.

2. InSb puslaidininkyje dešininės bangos perdavimo koeficientas gerokai didesnis nei kairinės.

3. Mažas oro tarpelis tarp puslaidininkių beveik neturi įtakos charakteristikoms. Poveikis pastebimas tik tada, kai oro tarpelio dydis yra vienos eilės su puslaidininkių storiu. Tada K dažninės charakteristikos trečiasis ekstremumas gerokai pasislenka žemųjų dažnių pusėn ir beveik susilieja su antruoju, o priklausomybė nuo magnetinio lauko indukcijos B pirmasis pagrindinis ekstremumas gerokai pasislenka didesnių B verčių pusėn.

4. Parenkant puslaidininkį su didesne krūvininkų judrumo μ verte, dažninių charakteristikų ekstremumai aštrėja ir gerokai padidėja.

5. Tik atskirų puslaidininkių elektronų koncentracijų skirtumai turi įtakos dažninių charakteristikų ir priklausomybių nuo B ekstremumų padėčiai; μ ir ε_L skirtumai neturi įtakos.

6. Dažninių charakteristikų ekstremumai ir priklausomybės nuo B vienas ryškus ekstremumas yra sąlygojami daugkartinių atspindžių slopinimo, nusakomo parametru μB .

7. Priklausomybėje nuo B pastebimas ryškus pirmasis ekstremumas, kiti neryškūs ekstremumai matomi esant mažesnėms B vertėms. Didėjant B , mažėja slopinimas.

8. Didinant B , dažninių charakteristikų ekstremumai didėja ir pasislenka aukštesniųjų dažnių pusėn.

Literatūra

1. **Pozhela J.** Plasma and current instabilities in semiconductors. – L.: Pergamon Pres, 1981. – 367 p.
2. **Лауринавичюс Л.** Высокочастотные развязывающие и управляющие устройства на полупроводниковой магнетоплазме. – Вильнюс: Техника, 1995. – 200 с.
3. **Jankauskas Z., Laurinavičius L.** Magnetic and electric excitation of magnetoplasmonic waves // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2002. – Nr. 2(37). – P. 32-34.

Pateikta spaudai 2003 11 17

R. Gaivenis, L. Laurinavičius, Z. Jankauskas. Elektromagnetinė magnetoplazminė banga daugiasluoksniame kelių puslaidininkių rezonatoriuje // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 4(53). – P. 16-21.

Nagrinėjami elektromagnetinių magnetoplazminių bangų rezonansai daugiasluoksniame puslaidininkinėje struktūroje. Sudaryta kelių puslaidininkių rezonatoriaus skaičiavimo metodika, AK programa, atlikta skaičiavimų rezultatų analizė. Iširta oro tarpelio tarp atskirų puslaidininkių sluoksnių įtaka rezonansiniam dažniui ir dažninių charakteristikų bei priklausomybių nuo magnetinio lauko stiprumo pobūdžiui. Poveikis ypač ryškus tuo atveju, kai tarpelio plotis yra tos pačios eilės kaip ir puslaidininkinio sluoksnio storis. Dažninių charakteristikų ekstremumai aštrėja ir gerokai išauga didėjant krūvininkų judrumui. Priklausomybė nuo magnetinio lauko stiprumo ryškiai matomas tik pagrindinis rezonansas. Il. 14, bibl. 3 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų, rusų k.).

R. Gaivenis, L. Laurinavičius, Z. Jankauskas. Electromagnetic Magnetoplasmonic Wave in Multi-layer Resonator With Several Semiconductors // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technology, 2004. – No. 4(53). – P. 16-21.

The electromagnetic magnetoplasmonic wave resonance in multi-layer semiconductor structure are investigated. For several semiconductors resonator makes calculation method, program for PC, analyze of calculations results are described. The influence of the air clearance between the semiconductor layers is considered. Especially we have sharp resonant peaks in the case when the thickness of air clearance and semiconductor layers is of the same order. For the materials with higher carrier mobility the resonant curves are much narrower and higher. The strong dependence of the main resonance from the magnetic field is observed. Ill. 14, bibl. 3 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

Р. Гайвянис, Л. Лауринавичюс, З. Янкаускас. Электромагнитная магнетоплазменная волна в многослойном резонаторе с несколькими полупроводниковыми пластинами // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – №4(53). – С. 16-21.

Исследованы резонансы на электромагнитной магнетоплазменной волне в многослойной полупроводниковой структуре. Для резонатора с несколькими полупроводниковыми пластинами создана методика расчета, программа на ПК, исследованы результаты расчетов. Оценено влияние воздушного зазора между полупроводниковыми пластинами резонатора на частотные характеристики и магнитные зависимости. Особенно сильное влияние зазора наблюдается в случае совпадения толщины зазора и толщины полупроводниковых пластин. Для материалов с высокой подвижностью носителей тока ширина резонансных кривых значительно сужается. В зависимостях от магнитной индукции постоянного магнитного поля наблюдается явно выраженный основной резонанс. Ил. 14, библиография 3 (на литовском языке, рефераты на литовском, английском и русском яз.).