

Gigahercinio diapazono elektromagnetinių magnetoplazminių bangų daugiasluoksnių puslaidininkinių rezonatorių dažninės charakteristikos

R. Gaivenis

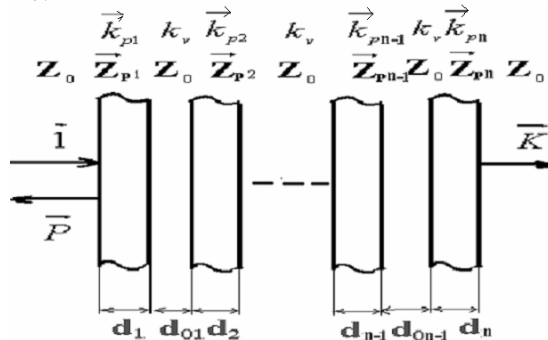
Programinės įrangos katedra, VIKO, J. Jasinskio g.15, LT-2600 Vilnius, Lietuva, tel +370 5 2497469, faks. 2497909, el. p. rimasg@viko.lt

Įvadas

Darbe [1] buvo ištirti vienos ir dviejų puslaidininkinių plokštelių, atskirtų oro tarpeliu, elektromagnetinių magnetoplazminių bangų rezonatoriai, esant silpnam magnetiniam laukui megaherciniame dažnių diapazone.

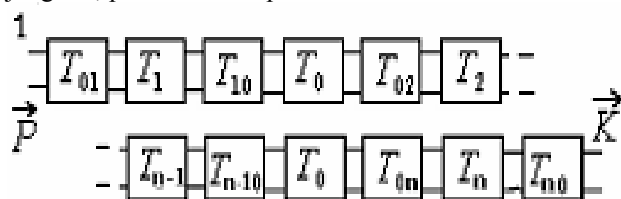
Šiame darbe nagrinėjamos apskaičiuotos sluoksniuotų rezonatorių dažninės charakteristikos, esant stipriam magnetiniam laukui, gigaherciniame dažnių diapazone. Nagrinėjamos dažninės charakteristikos, keičiant plokštelių skaičių nuo 1 iki 100.

1 pav. pavaizduotas tokio rezonatoriaus fizikinis modelis, sudarytas iš n puslaidininkinių sluoksnių, kurių storiai d_1, d_2, \dots, d_n , atskirtų oro tarpeliais, kurių storiai $d_{01}, d_{02}, \dots, d_{0n-1}$.



1 pav. Rezonatoriaus modelis

Tokią struktūrą galima laikyti pakopiniu keturpolių jungimu, pavaizduotu 2 pav.



2 pav. Sandūrų keturpoliai

Sandūrų keturpolių perdavimo matricų kompleksiniai koeficientai nustatomi, o kompleksiniai visos sluoksniuotos struktūros perdavimo ir atspindžio koeficientai apskaičiuojami dauginant atskirų keturpolių perdavimo matricas, kaip ir [1].

Visos sluoksniuotos struktūros perdavimo koeficientas

$$\vec{K} = K e^{j\varphi_K}, \quad (1)$$

atspindžio koeficientas

$$\vec{P} = P e^{j\varphi_P}; \quad (2)$$

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

Skaičiavimo rezultatai

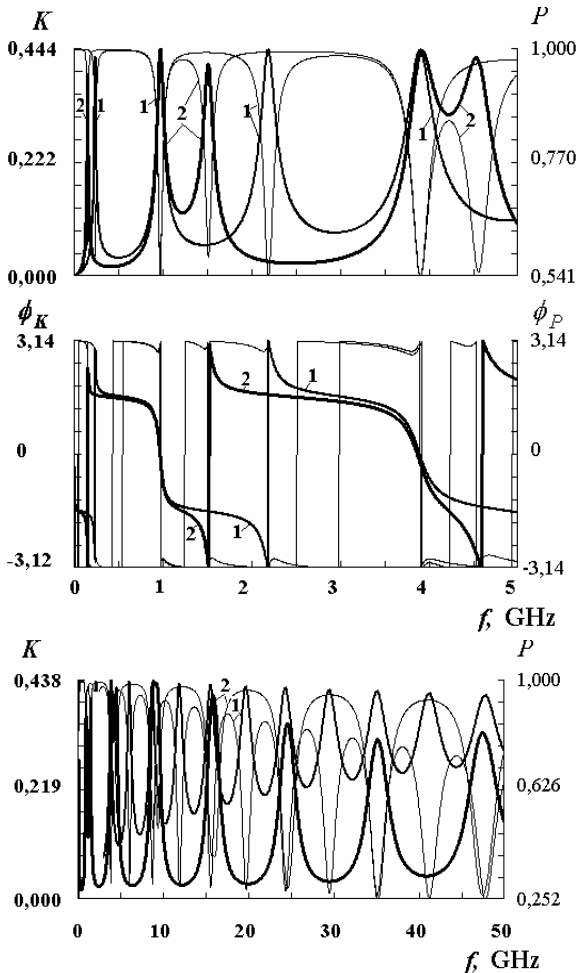
Skaičiavimuose panaudoti indžio antimonido puslaidininkio InSb parametrai, kaip ir [1,2]: elektronų koncentracija $N = 0,8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, elektronų judrumas $\mu = 5 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, dielektrinė skvarba $\epsilon_L = 15$. Magnetinio lauko indukcija padidinta iki $B = 10 \text{ T}$. Nagrinėjami rezonatoriai, sudaryti iš įvairaus plokštelių skaičiaus: $n = 1, 2, 3, 10, 50, 100$. Puslaidininkinių plokštelių storiai vienodi ir oro tarpeliai tarp jų irgi vienodi. Plokštelių storių suma parinkta pastovi, kintant plokštelių skaičiui, ir lygi 2 mm. Taip parinkti parametrai sąlygoja tą patį pagrindinį pirmąjį rezonansinį dažnį $f_1 = 0,244 \text{ GHz}$.

3–7 pav. 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. Kreivės 1, apskaičiuotos esant oro tarpeliui labai mažam, sutampa su vienos plokštelės kreivėmis.

Iš pateiktų dažninių charakteristikų, esant kelioms plokštelėms ($n = 2, 3$), kai oro tarpelio tarp plokštelių dydis vienos eilės su plokštelių storiu, galima daryti tokias išvadas. Kai $n = 2$ (3 pav.), antras, ketvirtas ir visi kiti dviejų kartotiniai rezonansai, kai φ_K ir φ_P vertės yra π kartotinės, visiškai nepasikeičia, o pirmas, trečias, penktas ir visi kiti rezonansai gerokai pasislenka link žemesniųjų

dažnių, todėl K ir P dažninės charakteristikos gaunamos plačiaujustiškesnės ir su dviem netolygumais.

Kai $n = 3$ (4 pav.), didinant oro tarpelį, trečias, šeštas, ir visi kiti trijų kartotiniai rezonansai visiškai nepasikeičia, o pirmas, antras, ketvirtas, penktas ir visi kiti rezonansai gerokai pasislenka link žemesniųjų dažnių, K ir P dažninės charakteristikos gaunamos plačiaujustiškesnės ir su trimis netolygumais.

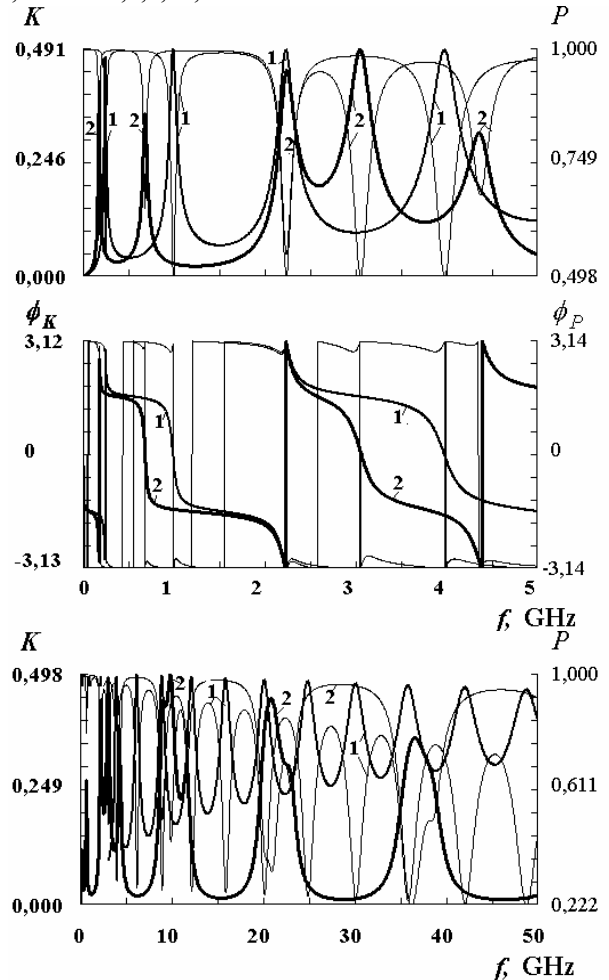


3 pav. Dažninės charakteristikos, kintant oro tarpeliui tarp dviejų puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = 1$ mm : 1 – $d_{01} = 0$, 2 – $d_{01} = 2$ mm

Didinant plokštelių skaičių, kai $n = 10$ (5 pav.), oro tarpelio įtaka išlieka tokio pat pobūdžio: dešimtas, dvidešimtas ir visi kiti dešimties kartotiniai rezonansai visiškai nepasikeičia, o pirmieji 9 rezonansai ir visi kiti pasislenka link žemesniųjų dažnių, K ir P dažninės charakteristikos gaunamos plačiaujustiškesnės ir gali turėti iki dešimties netolygumų. Dėl oro tarpelio K ir P siaurajuostės rezonansinės kreivės sustumdomos dažnių ašyje į plačiaujustę. Dėl to n siaurajuosčių rezonansinių kreivių formuoja vieną plačiaujustę kreivę su n netolygumų, kurių dydis mažėja, didinant plokštelių skaičių.

Iš 3, 4, 5 pav. pateiktų amplitudinių charakteristikų, apskaičiuotų platesniame dažnių diapazone, išplaukia tokios išvados. K ir P dažninių charakteristikų plačiaujustės rezonansinės kreivės pasikartoja periodiškai, esant didesniems dažniams, didėja pralaidumo juosta, mažėja kreivių netolygumai, mažėja perdavimo

koeficientas. Gautos K ir P plačiaujustės rezonansinės kreivės su ekstremumais, esant dažniams, artimiems vienos plokštelės, kurios storis lygus bendram visų plokštelių storiui, rezonansiniams dažniams, kurių numeriai lygūs $n * k$, kur $k = 1, 2, 3, \dots, n$.

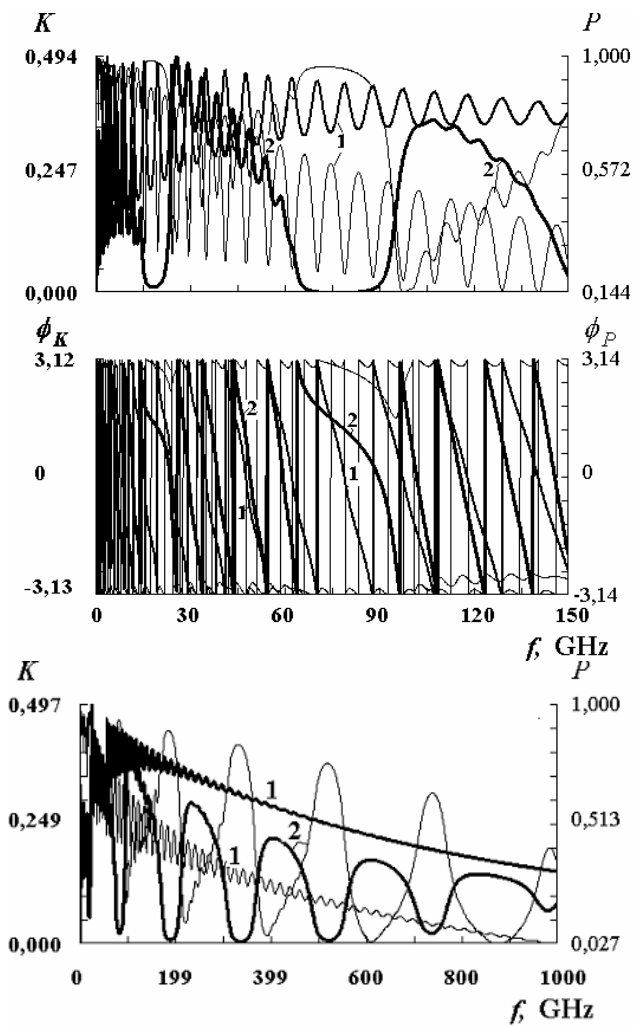


4 pav. Dažninės charakteristikos, kintant oro tarpeliams tarp trijų puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = d_3 = 0,66$ mm : 1 – $d_{01} = d_{02} = 0$, 2 – $d_{01} = d_{02} = 1$ mm

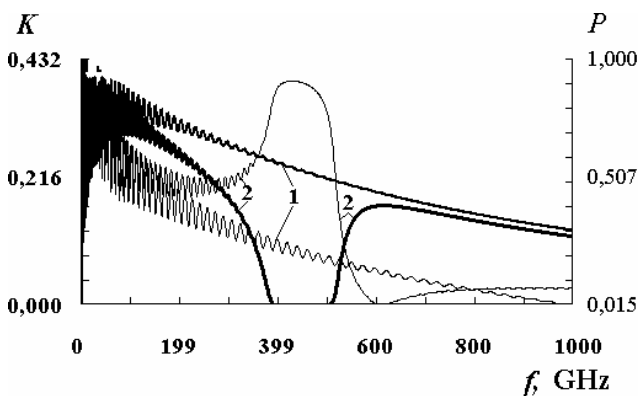
Oro tarpelis padidina fazinių charakteristikų statumą (padidina ir fazinę suvėlinimo trukmę) pralaidumo juostoje, o slopinimo juostoje atvirkščiai – sumažina fazinių charakteristikų statumą. φ_K ir φ_P vertės, π kartotinės, gaunamos esant dažniams, kai yra K dažninės charakteristikos netolygumų maksimumai pralaidumo juostoje. Taigi gaunami plačiaujustieji rezonatoriai, kurių fazinių charakteristikų rezonansų skaičius pralaidumo juostoje lygus plokštelių skaičiui n .

Toliau didinant plokštelių skaičių per 10, kaip parodyta 6 pav. ($n = 50$) ir 7 pav. ($n = 100$), oro tarpelio įtaka nepakinta, bet mažėja skaičius pralaidumo juostų, kurių praktiškai lieka tik dvi, pralaidumo juostos plėtėja, mažėja kreivių netolygumai.

Didinant plokštelių skaičių, kaip parodyta 8 pav., K slopinimo juosta tarp pralaidumo juostų pasislenka aukštesniųjų dažnių pusėn, slopinimo juostos plotis beveik nekinta. Esant dideliame plokštelių skaičiui, gali būti sukuriama plačiaujustieji užtveriamieji filtrai, kurių sukeliama nuostoliai slopinimo juostoje tarp gretimų pralaidumo juostų siekia šimtą decibelų.

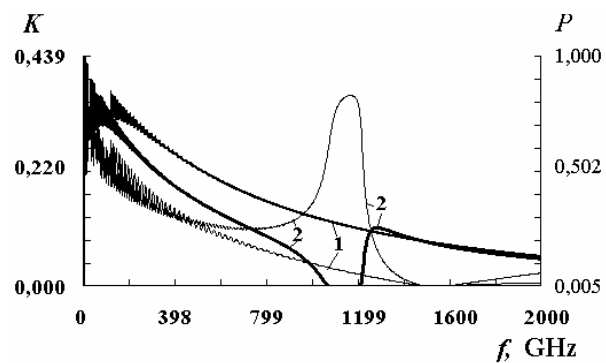


5 pav. Dažninės charakteristikos, kintant oro tarpeliams tarp 10 puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = \dots = d_{10} = 0,2$ mm : 1 - $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0$, 2 - $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,2$ mm

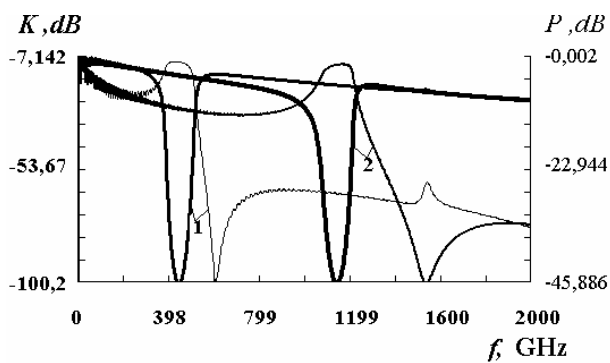


6 pav. Dažninės charakteristikos, kintant oro tarpeliams tarp 50 puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = \dots = d_{50} = 0,04$ mm : 1 - $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0$, 2 - $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,04$ mm

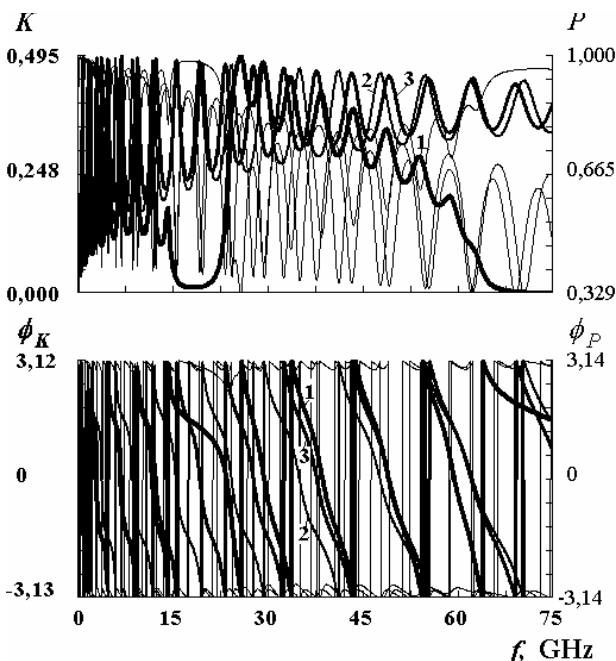
9 pav. pateiktos dažninės charakteristikos, kintant puslaidininkinių plokštelių skaičiui $n = 1, 10, 100$, kurių bendras storis ir bendras oro tarpelių storis išlieka lygūs 2 mm. Matyti, kad, kai $n = 1$ ir $n = 100$, charakteristikos nagrinėjamame dažnių diapazone beveik nesiskiria.



7 pav. Dažninės charakteristikos, kintant oro tarpeliams tarp 100 puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = \dots = d_{100} = 0,02$ mm : 1 - $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{099} = 0$, 2 - $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{099} = 0,04$ mm

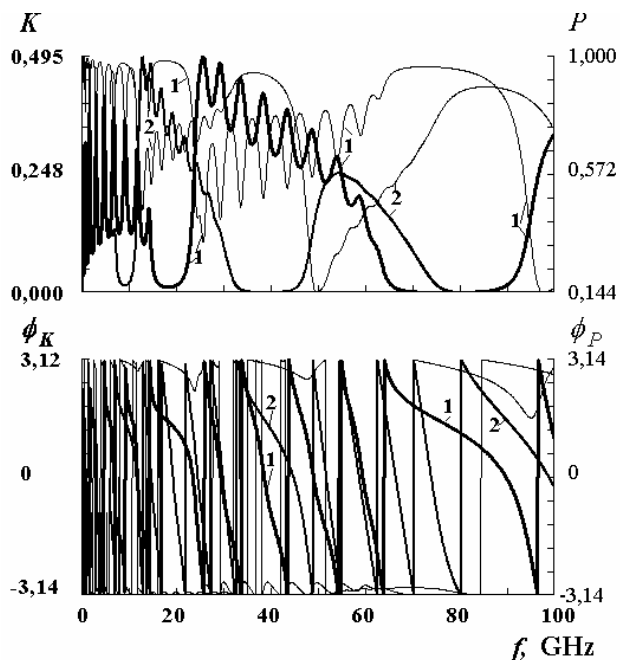


8 pav. Sukeliamų nuostolių dažninės priklausomybės, kintant puslaidininkinių plokštelių, kurių bendras storis $d_1 + d_2 + \dots + d_n = 2$ mm, oro tarpeliai $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{0n-1} = 0,04$ mm, skaičiui n : 1 - $n = 50$, 2 - $n = 100$

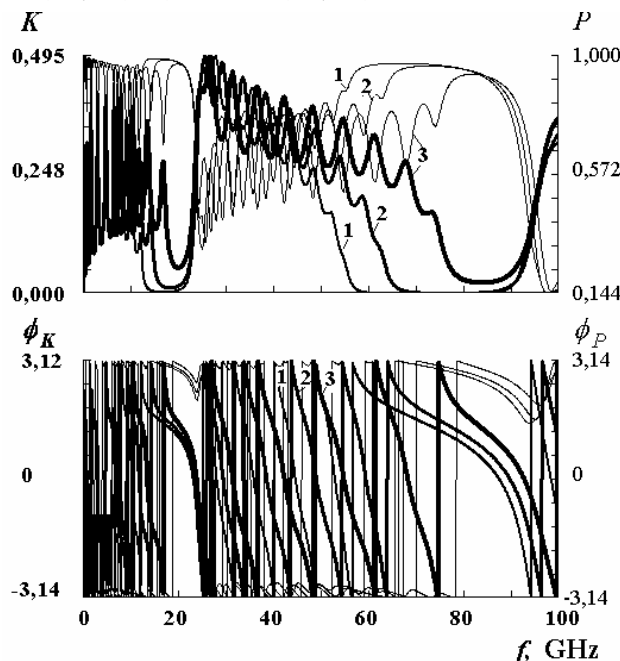


9 pav. Dažninės charakteristikos, kintant puslaidininkinių plokštelių, kurių bendras storis $d_1 + d_2 + \dots + d_n = 2$ mm, bendras oro tarpelių storis $d_{01} + d_{02} + \dots + d_{0n-1} = 2$ mm, skaičiui n : 1 - $n = 10$, 2 - $n = 1$, 3 - $n = 100$

10–14 pav. pateiktos rezonatoriaus su 10 plokštelių plačiajuostės dažninės charakteristikos.



10 pav. Dažninės charakteristikos 10 puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = \dots d_{10} = 0,2$ mm, oro tarpeliai $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,2$ mm, kintant magnetiniam laukui: 1 – $B = 10$ T, $K_m = 0,495$, 2 – $B = 5$ T, $K_m = 0,185$

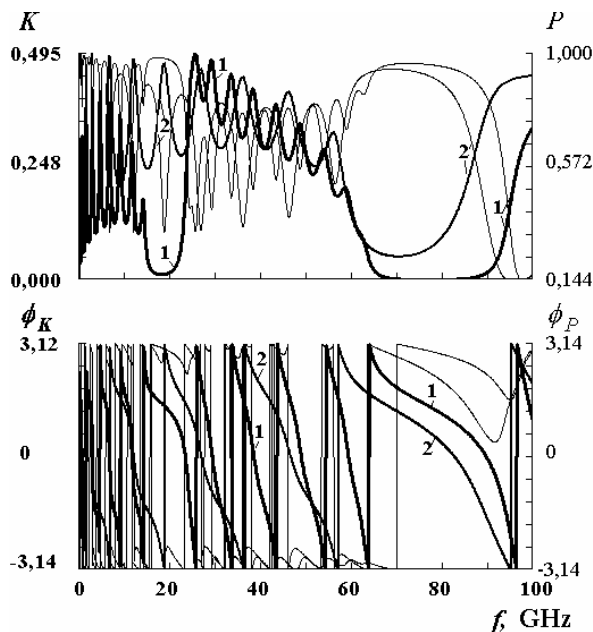


11 pav. Dažninės charakteristikos, kintant oro tarpeliams tarp 10 puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = \dots d_{10} = 0,2$ mm : 1 – $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,3$ mm, 2 – $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,2$ mm, 3 – $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,1$ mm

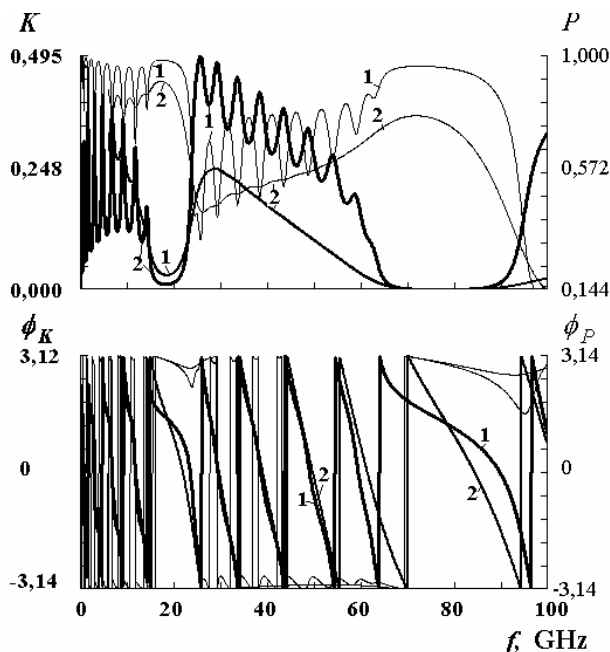
10 pav. parodyta, kaip galima keisti dažnių ašyje dažnines charakteristikas, keičiant magnetinio lauko indukciją B. Didinant B, dažnines charakteristikos pasislenka link aukštesnių dažnių, pralaidumo juosta praplatėja, perdavimo koeficientas padidėja. Tai patogus būdas derinti plačiajuosčių rezonatorių dažnines charakteristikas.

11 pav. parodyta, kaip kinta dažnines charakteristikos, keičiant oro tarpelį. Didinant tarpelį, pralaidumo juosta siaurėja tik iš aukštesniųjų dažnių pusės. K ir P dažnių charakteristikų netolygumai sumažėja.

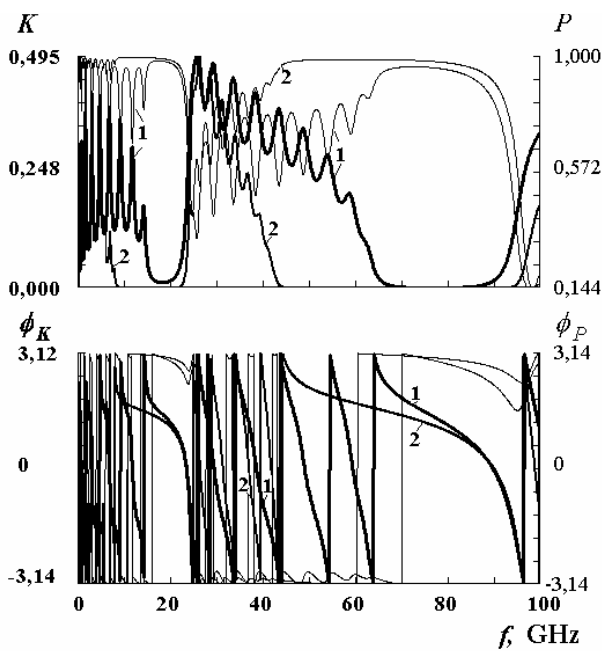
12, 13, 14 pav. parodyta, kaip kinta dažnines charakteristikos, keičiantis puslaidininkinių plokštelių fizikiniams parametrams.



12 pav. Dešimties puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = \dots d_{10} = 0,2$ mm, oro tarpeliai $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,2$ mm, dažnines charakteristikos, kintant puslaidininkio elektronų koncentracijai: 1 – $N = 0,8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $K_m = 0,495$, 2 – $N = 0,2 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $K_m = 0,756$



13 pav. Dešimties puslaidininkinių plokštelių, kurių storiai $d_1 = d_2 = \dots d_{10} = 0,2$ mm, oro tarpeliai $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,2$ mm, dažnines charakteristikos, kintant puslaidininkio elektronų judrumui : 1 – $\mu = 5 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $K_m = 0,495$, 2 – $\mu = 1 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $K_m = 0,133$



14 pav. Dešimties puslaidininkinių plokštelių, kurių storai $d_1 = d_2 = \dots d_{10} = 0,2 \text{ mm}$, oro tarpeliai $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,2 \text{ mm}$, dažninės charakteristikos, kintant puslaidininkinio dielektrinei skvarbai: 1 - $\varepsilon_L = 15$, $K_m = 0,495$, 2 - $\varepsilon_L = 1,5$, $K_m = 0,245$

Iš jų išeina, kad, mažėjant puslaidininkio koncentracijai N (12 pav.), didėja perdavimo koeficientas, amplitudinių charakteristikų netolygumai irgi didėja, netolygumų dažnis mažėja. K pralaidumo juosta išsiplėčia į žemesniųjų dažnių pusę.

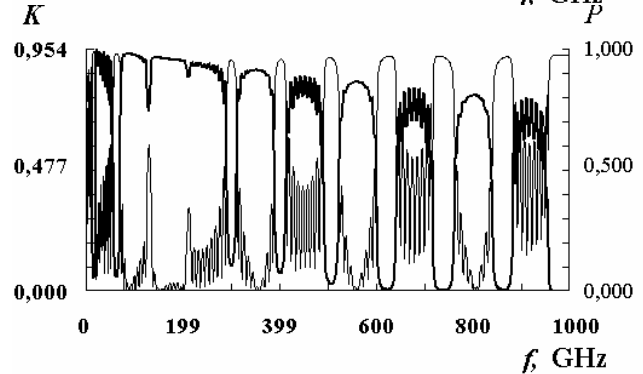
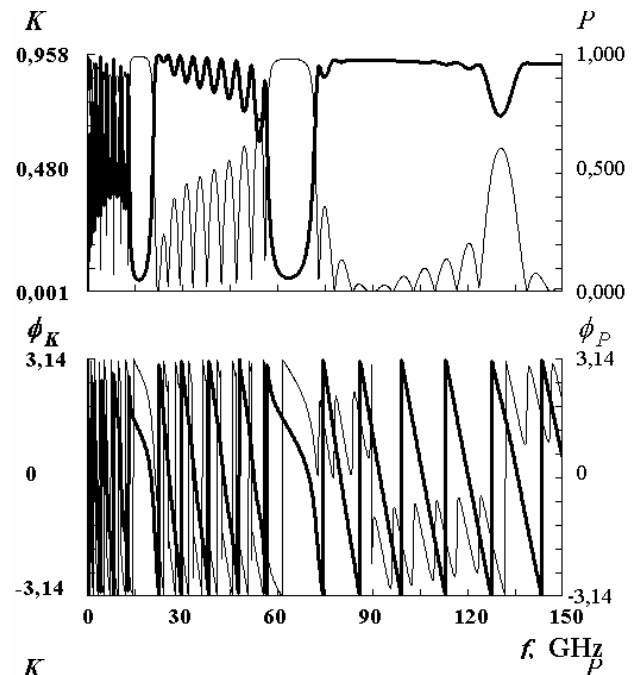
Mažėjant elektronų judrumui μ (13 pav.), perdavimo koeficientas mažėja, bet kartu mažėja ir charakteristikų netolygumai, jų net gali ir visiškai nebūti.

Mažėjant dielektrinei skvarbai ε_L (14 pav.), perdavimo koeficientas mažėja, pralaidumo juosta susiaurėja tik iš aukštesniųjų dažnių pusės. Amplitudinių charakteristikų netolygumai sumažėja

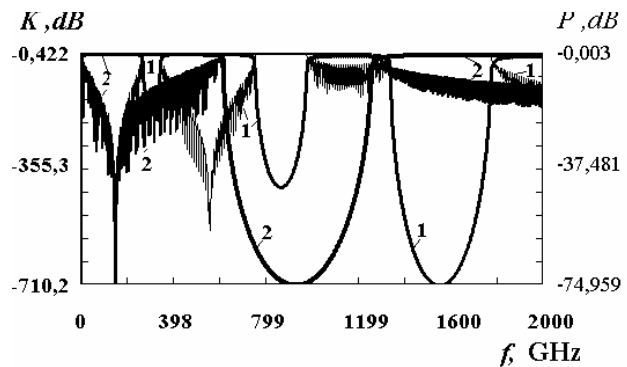
15,16 pav. parodyta, kaip pakinta dažninės charakteristikos, esant labai dideliems magnetiniams laukams, padidinus magnetinio lauko indukciją iki $B = 100 \text{ T}$ ir bendrą plokštelių storį iki $6,6 \text{ mm}$. Kaip išeina iš [1] pateiktų banginio skaičiaus k_p išraiškų, toks magnetinio lauko B padidinimas 10 kartų ir bendro plokštelių storio d padidinimas $\sqrt{10}$ karto nepakeičia sandaugos $k_p * d$. Todėl turėtų nepakisti rezonatoriaus rezonansų dažniai.

Iš 15 pav. palyginimo su 5 pav. išplaukia, kad, kai $n = 10$, padidinus B nuo 10 T iki 100 T , kreivių šlaitai gauti gerokai statesni. Perdavimo koeficiento K maksimumai artėja prie 1, o atspindžio koeficiento P minimumai artėja prie 0. Amplitudinių charakteristikų netolygumai beveik nepakinta, sumažėja charakteristikų nuolydis pralaidumo juostoje iš aukštesniųjų dažnių pusės. Susiaurėja užtvarinė juosta tarp pralaidumo juostų.

Iš 16 pav. palyginimo su 8 pav. išeina, kad, esant dideliame plokštelių skaičiui, kai $n = 50$ ir 100 , padidinus B nuo 10 T iki 100 T , labai padidėja K sukeliama nuostoliai užtvarinėje juostoje. Užtvarinės juostos tarp gretimų pralaidumo juostų plotis padidėja.



15 pav. Dažninės charakteristikos, kai $B=100 \text{ T}$, dešimties puslaidininkinių plokštelių, kurių storai $d_1 = d_2 = \dots d_{10} = 0,66 \text{ mm}$, oro tarpeliai $d_{01} = d_{02} = \dots = d_{09} = 0,66 \text{ mm}$



16 pav. Sukeliamų nuostolių dažninės priklausomybės, kai $B=100 \text{ T}$, kintant puslaidininkinių plokštelių, kurių bendras storis $d_1 + d_2 + \dots d_n = 6,6 \text{ mm}$, oro tarpelių bendras storis $d_{01} + d_{02} + \dots + d_{0n-1} = 6,6 \text{ mm}$, skaičiui n : 1 - $n = 50$, 2 - $n = 100$

Išvados

1. Parenkant puslaidininkinių plokštelių skaičių ir oro tarpelio tarp jų dydį, kuris turi būti vienos eilės su plokštelių storium, galima formuoti norimą gauti rezonatoriaus dažninę charakteristiką.

2. Esant nedideliui plokštelių skaičiui n , sukuriama siaurajuosčiai harmonikų rezonatoriai. Jų perdavimo ir atspindžio koeficientų dažninių charakteristikų pirmosios $n-1$ rezonansinės kreivės labai siaurajuostės ir aštrios, jos gali būti pastumtos žemųjų dažnių pusėn didinant oro tarpelį. Kitos rezonansinės kreivės, pradedant nuo n -osios, parenkant oro tarpelį, gali būti plačiajuosčiškesnės ir turėti netolygumų skaičių, lygų plokštelių skaičiui. Parenkant plokštelių skaičių, oro tarpeliu galima formuoti norimas plačiajuostes rezonansines kreives, paliekant tik rezonansus, kurių numeriai lygūs $n*k$, kur $k = 1, 2, 3, \dots, n$. Fazinių charakteristikų rezonansai, kai jų vertės yra π kartotinės, gaunami esant dažniams, kai pralaidumo juostoje yra perdavimo koeficiento dažninių charakteristikų netolygumų maksimumai.

3. Naudojant daug plokštelių (per 10) ir parenkant oro tarpelius tarp jų, sukuriama plačiajuosčiai rezonatoriai. Didinant plokštelių skaičių, didėja rezonatorių pralaidumo juostos, kurių paprastai lieka tik dvi.

4. Patogu keisti dažnines charakteristikas, keičiant magnetinio lauko indukciją B . Didinant B , charakteristikos pasislenka link aukštesniųjų dažnių, jų pralaidumo juosta didėja, didėja ir perdavimo koeficientas.

5. Didinant oro tarpelius tarp didelio skaičiaus plokštelių, galima siaurinti pralaidumo juostą iš aukštesniųjų dažnių pusės.

6. Nustatyta puslaidininkinių plokštelių fizikinių parametrų įtaka dažniniams plačiajuosčio rezonatoriaus charakteristikoms: mažėjant puslaidininkio elektronų koncentracijai N , didėja perdavimo koeficientas, jo pralaidumo juosta paplatėja į žemesniųjų dažnių pusę, charakteristikų netolygumai didėja, netolygumų dažnis mažėja; mažėjant elektronų judrumui μ , perdavimo koeficientas mažėja, bet kartu mažėja ir charakteristikų netolygumai; mažėjant dielektrinei skvarbai ϵ_L , perdavimo koeficientas mažėja, pralaidumo juosta susiaurėja tik iš aukštesniųjų dažnių pusės.

7. Didinant magnetinio lauko indukciją B iki 100 T, amplitudinių charakteristikų šlaitai darosi statesni, perdavimo koeficiento maksimumai artėja prie vieneto.

Literatūra

1. **Gaivenis R., Jankauskas Z., Laurinavičius L.** Elektromagnetinė magnetoplazminė banga daugiasluoksniame kelių puslaidininkinių rezonatoriuje // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 4(53). – P. 16-21.
2. **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 2005 07 13

R. Gaivenis. Frequency Characteristics of Electromagnetic Magnetoplasmonic Waves Multilayer Semiconductor Resonators in Gigacycle Frequency Region // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technology, 2006. – No. 2(66). – P. 62-67.

The calculated frequency characteristics in gigacycle frequency region of electromagnetic magnetoplasmonic waves multilayer semiconductor resonators with strong magnetic field are investigated. Investigations are applied with different number of semiconductor plates, which is changed from 1 to 100. When number of plates is large, air clearance between them increase bandwidth, in which number of discontinuities in frequency characteristics can be equal to number of plates. But in wide bandwidth there are many resonances, when phase characteristics are repeatable π . The influence of semiconductor physical parameters to frequency characteristics are considered: carrier density and mobility, dielectric constant and magnetic field. Ill. 16, bibl. 2 (in Lithuanian; summaries in English, Russian and Lithuanian).

Р. Гайвянис. Частотные характеристики многослойных резонаторов на электромагнитной магнетоплазменной волне в гигагерцевом диапазоне частот // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2006. – №. 2(66). – С. 62-67.

Исследованы рассчитанные частотные характеристики многослойных полупроводниковых резонаторов на электромагнитной магнетоплазменной волне в гигагерцном диапазоне частот при сильном магнитном поле. Исследованы резонаторы с различным числом полупроводниковых пластин, изменяемым от 1 до 100. Установлено, что при большом числе пластин, воздушные зазоры между ними значительно расширяют полосу пропускания, в которой число неравномерностей частотных характеристик может достигнуть число пластин. Но в полосе пропускания остаются резонансы, при которых фазовые характеристики кратны π . Показано влияние физических параметров полупроводника: концентрации электронов и подвижности, диэлектрической проницаемости, а также магнитного поля, на частотные характеристики широкополосных резонаторов. Ил. 16, библи. 2 (на литовском языке; рефераты на английском, русском и литовском яз.).

R. Gaivenis. Gigahercinio diapazono elektromagnetinių magnetoplazminių bangų daugiasluoksnių puslaidininkinių rezonatorių dažninės charakteristikos // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2006. – Nr. 2(66). – P. 62-67.

Nagrinėjamos apskaičiuotos elektromagnetinių magnetoplazminių bangų daugiasluoksnių puslaidininkinių rezonatorių dažninės charakteristikos gigaherciniame dažnių diapazone esant stipriam magnetiniam laukui. Nagrinėjami rezonatoriai, sudaryti iš skirtingo puslaidininkinių plokštelių skaičiaus, keičiamo nuo 1 iki 100. Nustatyta, kad, esant dideliui plokštelių skaičiui, oro tarpeliai tarp jų gerokai išplečia pralaidumo juostą, kurioje dažninių charakteristikų netolygumų skaičius gali pasiekti plokštelių skaičių. Tačiau pralaidumo juostoje lieka rezonansai, kai fazinės charakteristikos yra π kartotinės. Parodyta puslaidininkio fizikinių parametrų: elektronų koncentracijos ir judrumo, dielektrinės skvarbos ir magnetinio lauko, įtaka plačiajuosčių rezonatorių dažniniams charakteristikoms. Il. 16, bibl. 2 (lietuvių kalba; santraukos anglų, rusų ir lietuvių k.).