

Aukštų dažnių technologija, mikrobangos T 191

GIROTROPINIŲ BANGOLAIDŽIŲ TYRIMAS

Darius Plonis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: plonis.darius@gmail.com

Santrauka. Pristatomi bendrieji elektrokinaminis ir matematinis girotropinių bangolaidžių modeliai. Sukuriamas bendrasis algoritmas ir programa MATLAB® terpėje atvirųjų cilindrinųjų apskritojo skerspjūvio girotropinių bangolaidžių tyrimui. Ap-skaičiuojamos ir tiriamos giromagnetiniuose feritiniuose bei giroelektriniuose puslaidininkiniuose bangolaidžiuose, kuriuos išilgai veikia pastovus magnetinis laukas, sklindančių pagrindinio HE_{11} ir aukštesniųjų tipų EH_{11} bei HE_{12} bangų dispersinės charakteristikos. Lyginamas bangolaidžių iš YIG G-113 markės ferito ir n -InAs puslaidininkio bei išorinio dielektriko sluoksnio ir su juo plačiąjuostiškumas. Tiriama puslaidininkiniai p -Ge, p -GaAs bangolaidžiai 15–100 GHz dažnių ruože. Nu-statoma jų darbo dažnių juosta, jos centrinis dažnis ir bangolaidžių plačiąjuostiškumas.

Reikšminiai žodžiai: MATLAB®, girotropiniai, giromagnetiniai, giroelektriniai bangolaidžiai, Maksvelo lygtys, dispersinės charakteristikos.

Įvadas

Mikrobangų diapazone naudojami paprasčiausi atviri cilindriniai apskritojo skerspjūvio bangolaidžiai iš dielektrinių, feritinių arba puslaidininkinių medžiagų. Jie išsiskiria plačia darbo dažnių juosta ir charakteristikų skaičiavimo tikslumu, todėl tiriami ir naudojami iki šiol.

Darbo tikslas – sukurti bendrąjį algoritmą ir programą MATLAB® terpėje, ištirti atvirusius cilindrinis apskritojo skerspjūvio girotropinius bangolaidžius. Darbo aktualumas – šie bangolaidžiai pasižymi dideliu plačiąjuostiškumu, tačiau yra nepakankamai ištirti, todėl juos būtina tyrinėti toliau. Darbo problema – bangolaidžiuose sklindančioms bangoms gaunama transcendentinių tiesinių dispersinių lygčių sistema 8-tosios eilės determinanto pavidalu. Jame naudojamos specialiosios cilindrinės funkcijos su kompleksiniais argumentais. Sprendžiami uždaviniai: girotropinių bangolaidžių bendrųjų elektrokinaminio ir matematinio modelių pristatymas, algoritmo ir programos MATLAB® terpėje kūrimas, giromagnetiniuose ir giroelektriniuose bangolaidžiuose sklindančių bangų dispersinių charakteristikų skaičiavimas, bangolaidžių plačiąjuostiškumo tyrimas ir rezultatų analizė.

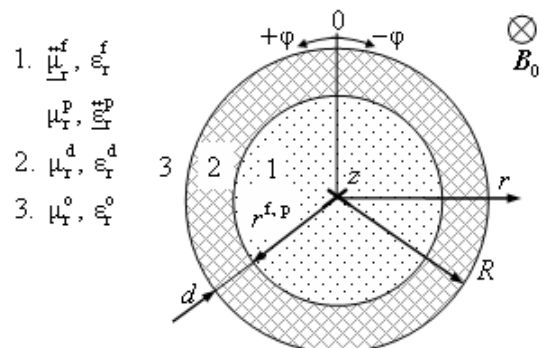
Bendrieji elektrokinaminis ir matematinis girotropinių bangolaidžių modeliai

Bendrasis elektrokinaminis atvirųjų cilindrinųjų apskritojo skerspjūvio girotropinių bangolaidžių modelis cilindrinėje koordinačių r, φ, z sistemoje pateiktas 1 pav. 1-oji modelio sritis yra pastoviojo magnetinio lauko, kurio

srauto tankio (indukcijos) vektorius B_0 , išilgai veikiama feritinė (ind. f) arba puslaidininkinė (ind. p) šerdis – girotropinė medžiaga, apibūdinama santykiniais kompleksiniais magnetinės arba dielektrinės skvarbų tenzoriais $\underline{\mu}_r^f, \underline{\epsilon}_r^p$ bei realiomis dielektrine arba magnetine skvarbomis $\epsilon_r^f, \mu_r^p = 1$.

2-oji modelio sritis, gaubianti bangolaidžio šerdį, yra išorinis nemagnetinio dielektriko sluoksnis. Jis apibūdinamas realiomis santykinėmis magnetine skvarba $\mu_r^d = 1$ ir dielektrine skvarba ϵ_r^d . 3-oji modelio sritis, supanti visą bangolaidį, yra oras, kurio santykinės magnetinė ir dielektrinė skvarbos $\mu_r^o = \epsilon_r^o \approx 1$.

Žemiau pateikiamas nurodytoje literatūroje aprašytas bendrasis matematinis atvirųjų cilindrinųjų apskritojo skerspjūvio girotropinių bangolaidžių modelis.



1 pav. Bendrasis elektrokinaminis atvirųjų cilindrinųjų apskritojo skerspjūvio girotropinių bangolaidžių modelis

Fig. 1. General electrodynamic model of the open cylindrical round cross-section gyrotropic waveguides

Feritų kompleksinį santykinės magnetinės skvarbos tenzorių aprašo (Ašmontas *et al.* 2006; Nickelson *et al.* 2007):

$$\underline{\underline{\mu}}_r^f = \begin{pmatrix} \underline{\mu}_{xx}^f & i\underline{\mu}_{xy}^f & 0 \\ -i\underline{\mu}_{xy}^f & \underline{\mu}_{xx}^f & 0 \\ 0 & 0 & \underline{\mu}_{zz}^f \end{pmatrix}, \quad (1)$$

čia $\underline{\mu}_{xx}^f, \underline{\mu}_{xy}^f, \underline{\mu}_{zz}^f$ – kompleksiniai tenzoriaus sandai.

Puslaidininkių kompleksinį santykinės dielektrinės skvarbos tenzorių nurodo formulė (Ašmontas *et al.* 2006; Nickelson *et al.* 2007):

$$\underline{\underline{\epsilon}}_r^p = \begin{pmatrix} \underline{\epsilon}_{xx}^p & i\underline{\epsilon}_{xy}^p & 0 \\ -i\underline{\epsilon}_{xy}^p & \underline{\epsilon}_{xx}^p & 0 \\ 0 & 0 & \underline{\epsilon}_{zz}^p \end{pmatrix}, \quad (2)$$

čia $\underline{\epsilon}_{xx}^p, \underline{\epsilon}_{xy}^p, \underline{\epsilon}_{zz}^p$ – kompleksiniai tenzoriaus sandai.

Girotropiniuose bangolaidžiuose sklindančių bangu dispersinėms lygtims gauti naudojamos kompleksinės diferencialinės Maksvelo lygtys (Nickelson *et al.* 2007):

$$\text{rot } \underline{E} = -i\omega \underline{\underline{\mu}}_r^f \underline{H}; \quad \text{rot } \underline{H} = i\omega \underline{\underline{\epsilon}}_r^p \underline{E}, \quad (3)$$

čia $\underline{E}, \underline{H}$ – harmoniškai kintančių elektrinio ir magnetinio laukų stiprio vektorių kompleksinės amplitudės.

Bendroju atveju atvirųjų cilindrinų apskritojų skerspjūvio girotropinių bangolaidžių su išoriniu dielektriko sluoksniu transcendentinių tiesinių dispersinių lygčių sistema gaunama 8-tosios eilės determinanto $D^{f,p} = \det[\underline{a}_{jk}] = 0$ pavidalu. Žemiau pateikiami keli nenuliniai kompleksiniai šio determinanto elementai (Ašmontas *et al.* 2006; Nickelson *et al.* 2007):

$$\underline{a}_{11} = J_m(\underline{k}_{\perp}^{f,p} r^{f,p}), \quad (4)$$

$$\underline{a}_{45} = -\frac{mh}{(\underline{k}_{\perp}^d)^2 r^{f,p}} N_m(\underline{k}_{\perp}^d r^{f,p}), \quad (5)$$

čia: h – išilginis bangos skaičius; $J_m(\underline{k}_{\perp}^{f,p} r^{f,p})$ – Beselio 1-sios rūšies m -tosios eilės cilindrinė funkcija su kompleksiniu 1-uju $\underline{k}_{\perp}^{f,p} r^{f,p}$ argumentu; $\underline{k}_{\perp}^{f,p}$ – kompleksinis 1-asis vidinis skersinis bangos skaičius (sklidimo koeficientas) feritinėje arba puslaidininkinėje šerdyje; m – hibridinių bangu pirmasis (azimutinio periodiškumo) indeksas, nurodantis stovinčiųjų bangu skaičių bangolaidžių perimetre pagal azimutinę koordinatę φ ; $N_m(\underline{k}_{\perp}^d r^{f,p})$ – Neimano kompleksinė m -tosios eilės cilindrinė funkcija su kompleksiniu argumentu $\underline{k}_{\perp}^d r^{f,p}$; \underline{k}_{\perp}^d – kompleksinis skersinis bangos skaičius (sklidimo koeficientas) išoriniame dielektriko sluoksnyje.

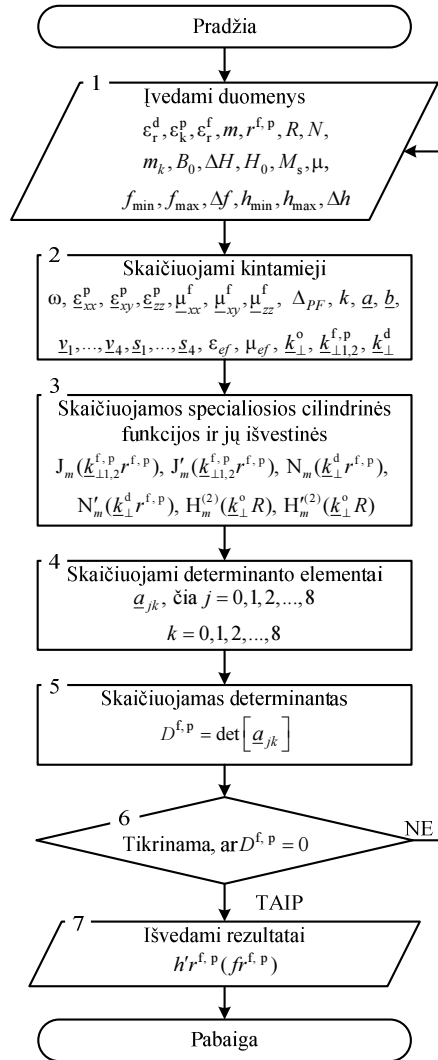
Algoritmo ir programos kūrimas

Bendrojo girotropinių bangolaidžių tyrimo programos MATLAB[®] terpėje algoritmo (2 pav.) žingsniai:

1. Įvedami duomenys.
2. Skaičiuojami kintamieji, pradedant nuo elektromagnetinių bangu dažnio f_{\min} ir išilginio bangu skaičiaus h_{\min} mažiausių duotų verčių.
3. Skaičiuojamos specialiosios cilindrinės funkcijos ir jų išvestinės su kompleksiniais argumentais pagal apibendrintą formulę (Абрамовиц *et al.* 1979):

$$\wp'_m(\underline{arg}) = \frac{m}{\underline{arg}} \wp_m(\underline{arg}) - \wp_{m+1}(\underline{arg}), \quad (6)$$

čia \underline{arg} – kompleksinis specialiųjų cilindrinų funkcijų ir jų išvestinių argumentas.



2 pav. Bendrasis sukurtos girotropinių bangolaidžių tyrimo programos MATLAB[®] terpėje algoritmas

Fig. 2. General algorithm of the created program in MATLAB[®] for analysis of the gyrotropic waveguides

4. Skaičiuojami nenuliniai kompleksiniai determinanto elementai \underline{a}_{jk} ($\underline{a}_{11} - \underline{a}_{88}$) pagal (4), (5) ir kt. formules (Nickelson *et al.* 2007).

5. Skaičiuojamas 8-tosios eilės determinantas pagal programos sudarytą skleistinę.

6. Tikrinama, ar $D^{f,p} = 0$. Ieškomos bangų dažnio f ir išilginių skaičių h vertės, kurioms esant determinanto reikšmės yra lygios arba labai artimos nuliui. Nuoseklus priartėjimo (iteraciniu) metodu rasti išilginiai bangų skaičiai h prilyginami fazės koeficientams h' . Jie ir dažnis f normuojami, dauginant iš šerdies spindulio $r^{f,p}$.

7. Išvedami rezultatai – bangų normuotųjų fazės koeficientų vertės, esant vienam normuotajam dažniui – $h'r^{f,p}$ ($fr^{f,p}$).

Pasinaudojus mūsų sukurtais bendroju algoritmu ir programa MATLAB[®] terpėje, buvo skaičiuojamos ir tiriamos skirtingų medžiagų girotropiniuose bangolaidžiuose sklindančių bangų dispersinės charakteristikos.

Giromagnetinių ir giroelektrinių bangolaidžių plačiajuostiškumo tyrimas

Šiam tyrimui buvo pasirinkti bangolaidžiai iš YIG G-113 markės ferito ir elektroninio laidumo n -InAs puslaidininkio. Jų dispersinių charakteristikų skaičiavimai buvo atlikti, kai dielektriko TM-15 išorinio sluoksnio santykinis (normuotasis) storis $d/r^p = d/r^f = 0$ arba 0,3, o sluoksnio santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r^d = 15$.

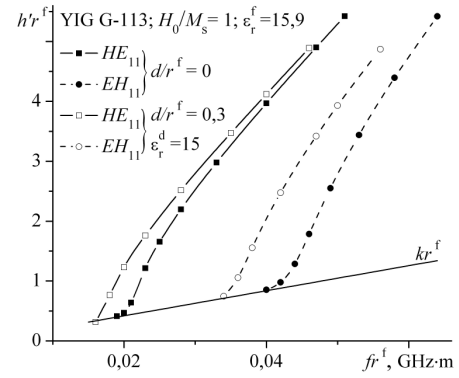
Bangolaidžių normuotoji darbo dažnių juosta $\Delta fr^{f,p}$ buvo nustatoma (Nickelson *et al.* 2007) kaip skirtumas tarp normuotųjų techninių krizinių dažnių $f_{kra}r^{f,p}$ pirmojo aukštesniojo tipo bangai EH_{11} ir $f_{knp}r^{f,p}$ pagrindinio tipo bangai HE_{11} . Bangolaidžių plačiajuostiškumas buvo skaičiuojamas pagal išraišką:

$$\delta_f^{f,p} = \left(\frac{\Delta fr^{f,p}}{f_c r^{f,p}} \right) \cdot 100, \% = \left(\frac{2 \cdot (f_{kra} - f_{knp}) r^{f,p}}{(f_{kra} + f_{knp}) r^{f,p}} \right) \cdot 100, \% \quad (7)$$

čia $f_c r^{f,p}$ – centrinis darbo dažnių juostos dažnis.

YIG G-113 markės ferito santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r^f = 15,9$, soties įmagnetėjimas $M_s = 140$ kA/m.

Apskaičiuotos giromagnetinių feritinių bangolaidžių be išorinio dielektriko sluoksnio ($d/r^f = 0$) normuotosios dispersinės charakteristikos (visur su juodais taškais) pateiktos 3 pav. Iš jų nustatyta, kad bangolaidžių normuotoji darbo dažnių juosta yra $\Delta fr^f = 0,021$ GHz·m, jos normuotasis centrinis dažnis $f_c r^f = 0,0295$ GHz·m, o bangolaidžių plačiajuostiškumas $\delta_f^f \approx 71$ %.



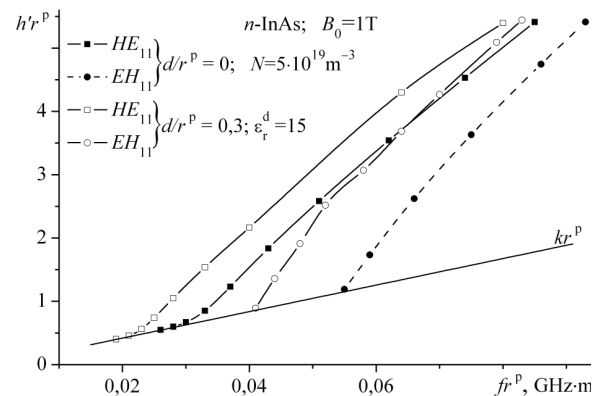
3 pav. Giromagnetinių bangolaidžių bangų dispersinės charakteristikos, kai IYG G-113 markės ferito santykinis įmagnetėjimas $H_0/M_s = 1$

Fig. 3. Dispersion characteristics of the waves gyromagnetic waveguides, when magnetization saturation of the IYG G-113 ferrite type is $H_0/M_s = 1$

Atsiradus išoriniam dielektriko sluoksniui, pakito elektromagnetinio lauko struktūra giromagnetinių bangolaidžių šerdyse ir jų dispersinės charakteristikos pasislinko į žemesniųjų dažnių pusę. Darbo dažnių juosta, jos centrinis dažnis ir bangolaidžių plačiajuostiškumas sumažėjo iki $\Delta fr^f = 0,018$ GHz·m, $f_c r^f = 0,026$ GHz·m, $\delta_f^f \approx 69,2$ %.

Giroelektrinių puslaidininkinių n -InAs bangolaidžių tyrimas buvo atliktas laikant, kad puslaidininkio kristalinės gardelės pastovioji $\epsilon_k^p = 12,3$, pagrindinių krūvininkų – elektronų efektinė masė $m^* = 0,023 m_e$, jų rimties masė $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, o judris $\mu = 4$ m²/V·s.

Apskaičiuotos bangų HE_{11} ir EH_{11} dispersinės charakteristikos pateiktos 4 pav. Pagal jas nustatytas n -InAs bangolaidžių plačiajuostiškumas.



4 pav. Giroelektrinių puslaidininkinių n -InAs bangolaidžių bangų dispersinės charakteristikos, kai elektronų koncentracija $N = 5 \cdot 10^{19}$ m⁻³, pastoviojo magnetinio srauto tankis $B_0 = 1$ T

Fig. 4. Dispersion characteristics of the waves gyroelectric n -InAs semiconductor waveguides, when the total concentration of electrons is $N = 5 \cdot 10^{19}$ m⁻³, magnetic induction is $B_0 = 1$ T

Giroelektrinių puslaidininkinių n -InAs bangolaidžių plačiajuostiškumas, kai $d/r^p = 0$, buvo gana didelis ir siekė $\delta_f^p \approx 57\%$.

Įvedus išorinį dielektriko sluoksnį, kurio santykinis (normuotasis) storis $d/r^p = 0,3$, sumažėjo n -InAs bangolaidžių darbo dažnių juosta ir jos centrinis dažnis. Be to, plačiajuostiškumas sumažėjo iki $\delta_f^p \approx 53,9\%$. Tai įvyko dėl to, kad išorinis dielektriko sluoksnis perskirstė elektrinį ir magnetinį laukus puslaidininkinėje šerdyje.

Tirtų giromagnetinių bangolaidžių plačiajuostiškumas buvo didesnis nei giroelektrinių: be išorinio dielektriko sluoksnio 14 %, o su dielektriko sluoksniu – 15,3 %. Tai nauji rezultatai, kurių nėra nurodytoje literatūroje.

Giroelektrinių bangolaidžių dispersinių charakteristikų skaičiavimas ir rezultatų analizė

Šioje dalyje tiriami giroelektriniai bangolaidžiai be išorinio dielektriko sluoksnio ir su juo, nes pastarieji bangolaidžiai mažiau ištirti, nei analogiški giromagnetiniai bangolaidžiai. Juose sklindančių bangų dispersinės charakteristikos buvo skaičiuojamos atitinkamai, neįvertinant ($d/r^p = 0$) ir įvertinant TM-15 markės išorinį dielektriko sluoksnį, kurio santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r^d = 15$, o santykinis (normuotasis) storis $d/r^p = 0,5$.

Dispersinių charakteristikų skaičiavimui buvo pasirinkti du skylinio laidumo puslaidininkiai: p -Ge, p -GaAs.

Atliekant giroelektrinių puslaidininkinių p -tipo bangolaidžių tyrimą, buvo atsižvelgta į lengvasias ir sunkiasias puslaidininkinių skylutes. Jų suminė efektinė masė buvo skaičiuojama Nickelson *et al.* (2007; 2008) pagal

$$m_{\Sigma}^* = (m_1 \cdot 0,045 + m_2 \cdot 0,955) m_e, \quad (8)$$

čia: m_1, m_2 – lengvųjų ir sunkiųjų skylių efektinė masė.

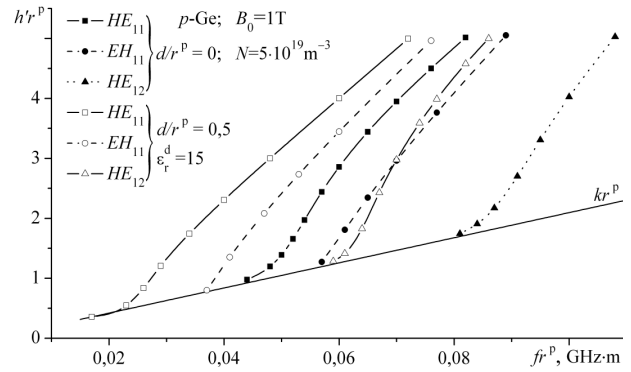
Ši formulė įvertino, kad buvo tiriami bangolaidžiai su dviejų rūšių krūvininkais, iš kurių lengvosios skylutės sudarė 4,5 %, o sunkiosios skylutės – 95,5 %.

Analogiška išraiška buvo taikoma ir krūvininkų suminiam efektiniam judriui skaičiuoti:

$$\mu_{\Sigma}^* = \mu_1 \cdot 0,045 + \mu_2 \cdot 0,955, \quad (9)$$

čia μ_1, μ_2 – lengvųjų ir sunkiųjų skylių judris.

Tiriant puslaidininkinius p -Ge bangolaidžius laikyta, kad jų kristalinės gardelės pastovioji $\epsilon_k^p = 16$. Skaičiavimai atlikti įvertinant (Dargys *et al.* 1994) lengvųjų skylių efektinę masę $m_1 = 0,043 m_e$ ir judrį $\mu_1 = 40,9 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ bei sunkiųjų skylių efektinę masę $m_2 = 0,279 m_e$ ir judrį $\mu_2 = 6,3 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.



5 pav. Giroelektrinių puslaidininkinių p -Ge bangolaidžių bangų dispersinės charakteristikos, kai skylių koncentracija $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, pastoviojo magnetinio srauto tankis $B_0 = 1 \text{ T}$

Fig. 5. Dispersion characteristics of the waves in gyroelectric p -Ge semiconductor waveguides, when the total holes concentration is $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, magnetic induction is $B_0 = 1 \text{ T}$

Giroelektriniuose p -Ge bangolaidžiuose sklindančių bangų dispersinės charakteristikos pateiktos 5 pav. Šiuo atveju išorinio dielektriko sluoksnio $\epsilon_r^d = 15$, $d/r^p = 0$ ir 0,5, skylių koncentracija $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, pastoviojo magnetinio srauto tankis $B_0 = 1 \text{ T}$.

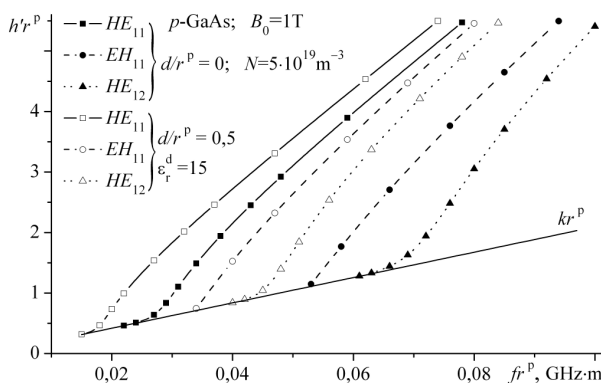
Iš 5 pav. matyti, kad, įvedus išorinį dielektriko sluoksnį, dispersinės charakteristikos pasislinko į žemesniųjų dažnių pusę. Kai $d/r^p = 0$, bangos HE_{11} atkirtos dažnis $f_{\text{ktp}} r^p = 0,045 \text{ GHz}\cdot\text{m}$, bet, esant $d/r^p = 0,5$, $f_{\text{ktp}} r^p = 0,022 \text{ GHz}\cdot\text{m}$. Todėl p -Ge bangolaidžių plačiajuostiškumas padidėjo dvigubai ir tapo $\delta_f^p = 50,8\%$.

Atliekant giroelektrinių p -GaAs bangolaidžių tyrimą, kristalinės gardelės pastovioji buvo $\epsilon_k^p = 12,9$. Skaičiavimai atlikti įvertinant (MSN Archive) lengvųjų skylių efektinę masę $m_1 = 0,082 m_e$ ir judrį $\mu_1 = 0,4 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ bei sunkiųjų skylių efektinę masę $m_2 = 0,45 m_e$ ir judrį $\mu_2 = 0,4 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Šių bangolaidžių dispersinės charakteristikos pateiktos sekančiame puslapyje 6 pav. Skaičiavimai buvo atlikti, kai $\epsilon_r^d = 15$, $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ir $B_0 = 1 \text{ T}$.

Kai nėra išorinio dielektriko sluoksnio ($d/r^p = 0$), šių bangolaidžių plačiajuostiškumas siekia $\delta_f^p = 75,3\%$.

Iš dispersinių charakteristikų matyti, kad jos vėl pasislinko į žemesniųjų dažnių pusę, įvedus $d/r^p = 0,5$. Kartu pasislinko p -GaAs bangolaidžių darbo dažnių juosta ir jos centrinis dažnis bei sumažėjo bangolaidžių plačiajuostiškumas iki $\delta_f^p = 69,4\%$.

Žinant šiuos naujus rezultatus, galima ištirtus bangolaidžius taikyti, pvz., mikrobangų fazės keitikliuose.



6 pav. Giroelektrinių puslaidininkinių p -GaAs bangolaidžių bangų dispersinės charakteristikos, kai skylių koncentracija $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, pastoviojo magnetinio srauto tankis $B_0 = 1 \text{ T}$

Fig. 6. Dispersion characteristics of the waves in gyroelectric p -GaAs semiconductor waveguides, when the total holes concentration is $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, magnetic induction is $B_0 = 1 \text{ T}$

Išvados

1. Sukurtas bendrasis algoritmas ir programa MATLAB[®] terpėje tirti dispersinėms charakteristikoms bangų, kurios sklinda atviruosiuose cilindrinuose apskritą skerspjūvio girotropiniuose bangolaidžiuose.

2. Ištirtos HE_{11} , EH_{11} ir HE_{12} bangų, kurios sklinda girotropiniuose bangolaidžiuose iš YIG G-113 markės ferito ir n -InAs, p -Ge, p -GaAs puslaidininkinių be išorinio dielektriko sluoksnio ir su juo, dispersinės charakteristikos 15–100 GHz dažnių ruože.

3. Giromagnetinių bangolaidžių iš YIG G-113 markės ferito plačiajuostiškumas didesnis už giroelektrinių bangolaidžių iš n -InAs puslaidininkio plačiajuostiškumą: be išorinio dielektriko sluoksnio 14 %, su juo – 15,3 %.

4. Didžiausias yra giroelektrinių p -GaAs puslaidininkinių bangolaidžių plačiajuostiškumas: be dielektriko sluoksnio 75,3 %, su juo – 69,4 %.

5. Išorinis dielektriko sluoksnis pakeičia elektromagnetinio lauko struktūrą visų girotropinių bangolaidžių šerdyse, šuntuodamas jas ir orą. Todėl visais atvejais dispersinės charakteristikos, darbo dažnių juosta ir jos centrinis dažnis pasislenka į žemesniųjų dažnių pusę.

6. Tačiau skirtingų bangolaidžių plačiajuostiškumas gali nedaug sumažėti (YIG G-113, n -InAs, p -GaAs) arba žymiai padidėti (p -Ge), priklausomai nuo šerdies medžiagos, nesikeičiant išorinio dielektriko sluoksnio dielektriinei skvarbai ir santykiniam (normuotajam) storiui.

Literatūra

- Ašmontas, S.; Nickelson, L.; Mališauskas, V. 2006. Įmagnetintų puslaidininkinių ir feritinių bangolaidžių tyrimas, *Elektronika ir elektrotechnika* 2(66): 56–61.
- Dargys, A.; Kundrotas, J. 1994. *Handbook on Physical Properties of Ge, Si, GaAs and InP*. Vilnius. Science and Encyclopedia Publishers. 262 p.
- Nickelson, L.; Ašmontas, S.; Mališauskas, V.; Martavičius, R. 2008. The dependence of open cylindrical magnetoactive p -Ge and p -Si plasma waveguide mode cutoff frequencies on hole concentrations, *J. Plasma Physics* 75(1): 35–51. doi:10.1017/S0022377808007307
- Nickelson, L.; Ašmontas, S.; Mališauskas, V.; Šugurovas, V. 2007. *Atvirieji cilindriniai girotropiniai bangolaidžiai*. Monografija. Vilnius: Technika. 248 p. ISBN 978-9955-28-180-1.
- MSN Archive – Physical Properties of semiconductors [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>.
- Абрамовиц, М.; Стиган, И. 1979. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами*. Москва: Наука. 832 с.

GYROTROPIC WAVEGUIDES ANALYSIS

D. Plonis

Abstract

An algorithm and program in MATLAB[®] for the dispersions characteristics calculation in wide frequency range 15–100 GHz was created. We calculated and analyzed in ferrite and semiconductor waveguides, then they are longitudinally magnetized, also we analyzed main mode HE_{11} and higher modes EH_{11} and HE_{12} dispersion characteristics. We analyzed semiconductor p -Ge, p -GaAs waveguides and compared gyromagnetic and gyroelectric waveguides bandwidth with dielectrical layer. We decided that outer dielectrical layer changed waveguide working frequency range. We draw conclusion that it can be used for made microwave devices for example phase shifters or other devices.

Keywords: MATLAB[®], gyrotropic, gyromagnetic, gyroelectric waveguides, Maxwell equations, dispersion characteristics.