

CILINDRINIŲ GIROELEKTRINIŲ *p*-Ge BANGOLAIDŽIŲ NUOSTOLIŲ PRIKLAUSOMYBĖS  
NUO DVIEJŲ RŪŠIŲ KRŪVININKŲ KONCENTRACIJOS TYRIMAS

Artūras Bubnelis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
El. paštas arturas.bubnelis@vgtu.lt

**Santrauka.** Darbe pateikiami dviejų rūšių krūvininkų (lengvųjų ir sunkiųjų skylių) puslaidininkinių *p*-Ge giroelektrinių bangolaidžių, kuriuos veikia  $\vec{B}_0 = 1$  T indukcijos nuolatinis išilginis magnetinis laukas, dispersinių charakteristikų skaičiavimo rezultatai, įvertinant nuostolius bangolaidyje. Skaičiavimo algoritmas leidžia tirti bangolaidžius, pagamintus iš medžiagų, atnešančių labai didelius nuostolius. Tiriamos 1 mm spindulio bangolaidžių dažninės charakteristikos 5–200 GHz dažnių ruože. Laisvųjų krūvininkų koncentracija bangolaidyje yra  $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . Nustatoma nuostolių priklausomybė nuo sunkiųjų skylių krūvininkų koncentracijos  $N_h$ , esant trimis skirtingoms sunkiųjų skylių koncentracijoms, kai  $N_h$  sudaro 5 %, 50 % ir 95 % nuo visų krūvininkų koncentracijos  $N$  bangolaidyje.

**Reikšminiai žodžiai:** girotropiniai, giroelektriniai bangolaidžiai, *p*-Ge, puslaidininkių plazma, nuolatinis magnetinis laukas, dielektrinės skvarbos tenzorius, sunkiosios ir lengvosios skylutės, nuostoliai, dispersinės charakteristikos, kompleksinė išilginė sklaidymo konstanta.

## Įvadas

Puslaidininkinė medžiaga, esanti išoriniame nuolatiniaame magnetiniame lauke, vadinama magnetiškai aktyvia puslaidininkio plazma arba giroelektrine medžiaga. Elektromagnetinių (EM) bangų sklaidimas neapribotai magnetiškai aktyvioje puslaidininkių plazmoje ištirtas darbuose (Palik, Furdyna 1970; Baynham 1968). EM bangų sklaidimas metaliniuose magnetiškai aktyvia plazma užpildytuose bangolaidžiuose nagrinėtas darbuose (Prati 2003; Liu *et al.* 2000). Atviriesiems (be metalinio ekrano) bangolaidžiams tirti skirta nedidelė dalis darbų. Šis darbas skirtas tokiems bangolaidžiams tirti.

Magnetiškai aktyvios puslaidininkių plazmos bangolaidžių pagrindu kuriami įvairūs mikrobangų įtaisai: fazės keitikliai, modulatoriai, filtrai, jungikliai, konverteriai (Sujuki, Yokoshima 2003; Eden *et al.* 2005; Iqbal, Gibson 2001; Nickelson *et al.* 2007). EM bangų slopinimas ir fazė šiuose įtaisuose gali būti valdomi išoriniu nuolatinio magnetinio lauku arba optiškai. Magnetiškai aktyvūs puslaidininkiniai bangolaidžiai taip pat naudojami kuriant optoelektronikos, plazminius įtaisus ir lazerius (Ballato *et al.* 2011; Hubers *et al.* 2005).

Elektromagnetinės bangos sklaidymo konstantos atvirose cilindrinuose bangolaidžiuose priklausomybė nuo dažnio pateikta darbuose (Iqbal, Gibson 2001; Nickelson *et al.* 2009; Mališauskas, Plonis 2010). Tačiau juose nagrinėjama nuostolių priklausomybė bangolaidžiuose.

Šiame darbe pristatomos atvirtųjų cilindrinų germanio (Ge) bangolaidžių kompleksinės dispersinės charakteristikos. Atliekant skaičiavimus įvertinta tai, kad *p*-Ge medžiaga turi skirtingas lengvųjų ir sunkiųjų skylių koncentracijas. Kraštinis elektrodinamikos uždavinys šiuo atveju sprendžiamas dalinių sričių metodu. Dispersinės lygties kompleksinių šaknų ieškoma Miulerio metodu (Asmontas *et al.* 2010). Girotropinių bangolaidžių dispersinė lygtis visų tipų EM bangoms pateikta darbe (Nickelson *et al.* 2007).

Šiame darbe taip pat nagrinėjamos kompleksinės išilginės bangos sklaidymo konstantos  $\underline{h} = h' - ih''$  priklausomybė nuo dviejų rūšių krūvininkų koncentracijos ir elektromagnetinių virpesių dažnio. Išilginės bangos sklaidymo konstantos išraiška  $h'$  žymi bangos fazės koeficientą, o  $h''$  – bangolaidžio slopinimo koeficientą (nuostolius). Tyrimas atliktas kairiosios apskritiminės poliarizacijos ( $e^{+i\varphi}$ ) EM bangų 5–200 GHz dažnių ruože. Šio tipo bangos dar vadinamos helikoninėmis bangomis. Skaičiavimams naudota MATLAB kalba parašyta programa.

Buvo aptikta svarbių *p*-Ge bangolaidžių savybių, kurios gali būti naudingos kuriant valdomus mikrobangų įtaisus.

*p*-Ge santykinės dielektrinės skvarbos tenzorius

Puslaidininkio, esančio nuolatiniaame išilginiame magnetiniame lauke, elektrodinaminės savybės apibūdina san-

tykinės dielektrinės skvarbos tenzorius  $\vec{\underline{\underline{\epsilon}}}_r^{p-Ge}$ . Tenzoriaus komponentai priklauso nuo tokių medžiagos parametrų: puslaidininkio gardelės pastoviosios, krūvininkų efektinės masės ir judrio, magnetinio lauko indukcijos  $\vec{B}_0$ , krūvininkų koncentracijos  $N$  ir EM virpesių dažnio  $f$  (Nickelson *et al.* 2009):

$$\vec{\underline{\underline{\epsilon}}}_r^{p-Ge} = \begin{pmatrix} \underline{\underline{\epsilon}}_{xx}^{p-Ge} & i\underline{\underline{\epsilon}}_{xy}^{p-Ge} & 0 \\ -i\underline{\underline{\epsilon}}_{xy}^{p-Ge} & \underline{\underline{\epsilon}}_{xx}^{p-Ge} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{\underline{\epsilon}}_{zz}^{p-Ge} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Kadangi  $p$ -Ge turi dviejų rūšių krūvininkus, skaičiuojant kompleksinius tenzoriaus komponentus, reikia įvertinti sunkiųjų ir lengvųjų skylių įtaką.  $\underline{\underline{\epsilon}}_{xx}^{p-Ge}$ ,  $\underline{\underline{\epsilon}}_{xy}^{p-Ge}$ ,  $\underline{\underline{\epsilon}}_{zz}^{p-Ge}$  yra kompleksiniai tenzoriaus  $\vec{\underline{\underline{\epsilon}}}_r^{p-Ge}$  komponentai:

$$\underline{\underline{\epsilon}}_{xx}^{p-Ge} = \underline{\underline{\epsilon}}_k^{p-Ge} \left( 1 - \sum_{n=1}^2 \left( \frac{i\omega_{pn}^2}{\omega} \cdot \frac{(v_n + i\omega)}{(v_n + i\omega)^2 + \omega_{cn}^2} \right) \right), \quad (2)$$

$$\underline{\underline{\epsilon}}_{xy}^{p-Ge} = -\underline{\underline{\epsilon}}_k^{p-Ge} \sum_{n=1}^2 \left( \frac{\omega_{pn}^2}{\omega} \cdot \frac{\omega_{cn}}{(v_n + i\omega)^2 + \omega_{cn}^2} \right), \quad (3)$$

$$\underline{\underline{\epsilon}}_{zz}^{p-Ge} = \underline{\underline{\epsilon}}_k^{p-Ge} \left( 1 - \sum_{n=1}^2 \left( \frac{i\omega_{pn}^2}{\omega} \cdot \frac{1}{(v_n + i\omega)} \right) \right), \quad (4)$$

čia  $\omega_{pn}$  – plazmos savųjų virpesių kampinis dažnis;  $\omega_{cn}$  – ciklotroninio rezonanso kampinis dažnis;  $v_n$  – vidutinis laisvųjų krūvininkų susidūrimų su puslaidininkio gardele dažnis;  $\omega$  – kampinis EM virpesių dažnis (Nickelson *et al.* 2009). Indeksas  $n$  formulėse parodo, kad parametras yra skaičiuojamas atskirai sunkiosioms ( $n=1$ ) ir lengvosioms ( $n=2$ ) skylutėms.

Keičiant skirtingų rūšių krūvininkų koncentracijas, galima keisti elektromagnetinių bangų sklaidimą puslaidininkio plazmoje.

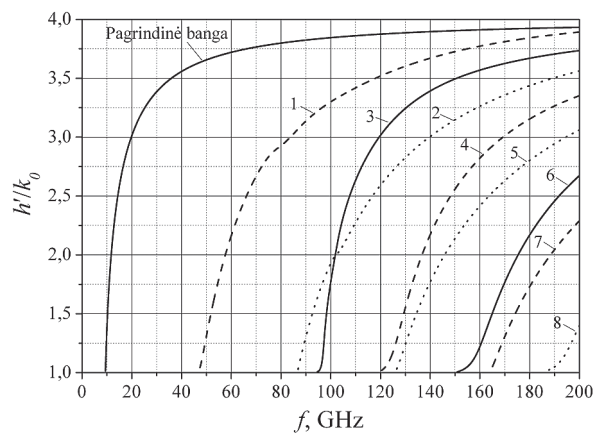
### Dispersinių charakteristikų priklausomybė nuo sunkiųjų skylių koncentracijos

Puslaidininkinių  $p$ -Ge bangolaidžių dispersinės charakteristikos apskaičiuotos, kai sunkiųjų skylių koncentracija  $N_h$  sudaro 5 %, 50 % ir 95 % visų krūvininkų koncentracijos  $N$  bangolaidyje. Laisvųjų krūvininkų koncentracija (įskaitant lengvasias  $N_l$  ir sunkiasias  $N_h$  skylutes) lygi  $N = N_h + N_l = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . Skaičiavimai atlikti, esant bangolaidžio spinduliui 1 mm.

Sunkiųjų skylių efektinė masė  $p$ -Ge yra  $m_h^* = 0,279m_e$ , judrumas –  $\mu_h^* = 6,3 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Lengvųjų skylių efektinė masė yra  $m_l^* = 0,043m_e$ , judrumas –  $\mu_l^* = 40,9 \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Puslaidininkio gardelės pastovioji lygi  $\underline{\underline{\epsilon}}_k^{p-Ge} = 16$ .

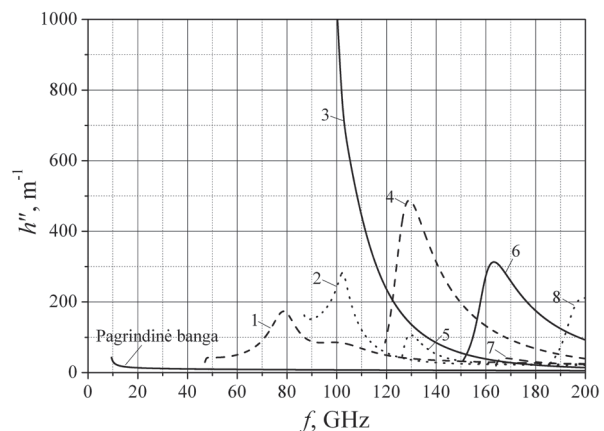
1, 3 ir 5 pav. pavaizduotos pagrindinio ir aštuonių aukštesniųjų bangos tipų normuotos bangos sklaidimo konstantos realiosios dalies  $h'/k_0$  priklausomybės nuo dažnio dažnių ruože 5–200 GHz, čia  $k_0$  – bangos sklaidimo vakuumo konstanta.

Žinoma, kad cilindrinė dielektrinių bangolaidžių pagrindinis bangos tipas  $HE_{11}$  yra hibridinė banga, kurios pirmasis indeksas lygus 1. Šiame darbe nagrinėjami bangų tipai, kurių pirmasis indeksas lygus 1, t. y. tos pačios simetrijos (pagal  $\varphi$ ) kaip ir pagrindinis bangos tipas. 2, 4 ir 6 pav. pavaizduoti nuostolių grafikai. Pirmasis aukštesnis bangos tipas pažymėtas numeriu 1, antrasis – 2 ir t. t.



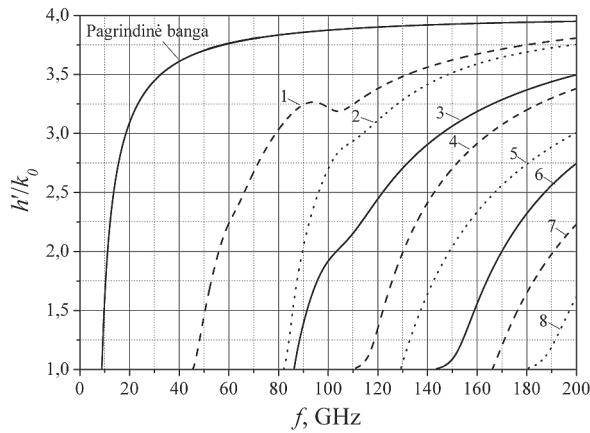
**1 pav.** Normuoto bangos fazės koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai sunkiųjų skylių koncentracija sudaro 5 % visų krūvininkų

**Fig. 1.** The dependence of the normalized propagation constant of a waveguide on frequencies when heavy hole concentration makes 5% of the total carrier concentration



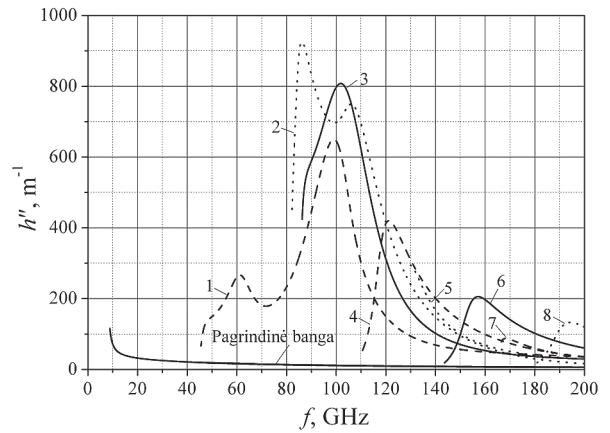
**2 pav.** Bangolaidžio slopinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai sunkiųjų skylių koncentracija sudaro 5 % visų krūvininkų

**Fig. 2.** The dependence of waveguide losses on frequencies when heavy hole concentration makes 5% of the total carrier concentration



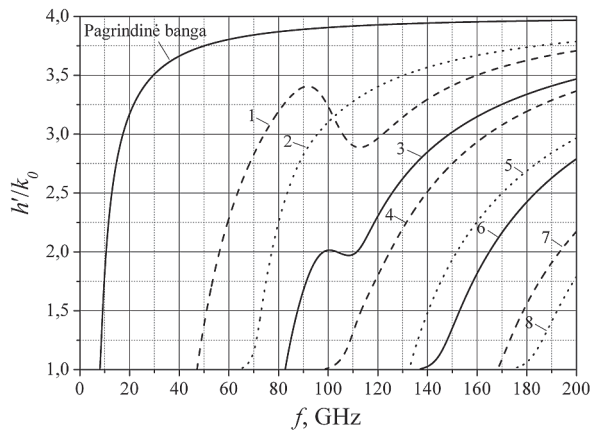
**3 pav.** Normuoto bangos fazės koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai sunkiųjų skylių koncentracija sudaro 50 % visų krūvininkų

**Fig. 3.** The dependence of the normalized propagation constant of a waveguide on frequencies when heavy hole concentration makes 50% of the total carrier concentration



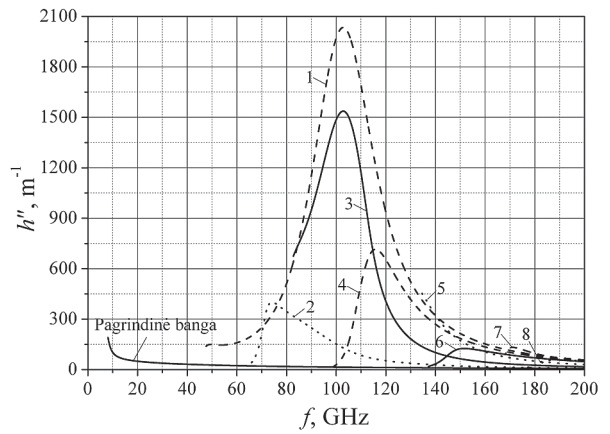
**4 pav.** Bangolaidžio slopinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai sunkiųjų skylių koncentracija sudaro 50 % visų krūvininkų

**Fig. 4.** The dependence of waveguide losses on frequencies when heavy hole concentration makes 50% of the total carrier concentration



**5 pav.** Normuoto bangos fazės koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai sunkiųjų skylių koncentracija sudaro 95 % visų krūvininkų

**Fig. 5.** The dependence of the normalized propagation constant of a waveguide on frequencies when heavy hole concentration makes 95% of the total carrier concentration



**6 pav.** Bangolaidžio slopinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai sunkiųjų skylių koncentracija sudaro 95 % visų krūvininkų

**Fig. 6.** The dependence of waveguide losses on frequencies when heavy hole concentration makes 95% of the total carrier concentration

Kai  $N_h / N$  yra 0,05; 0,5; 0,95, pagrindinio bangos tipo kriziniai dažniai atitinkamai lygūs 9,4, 8,83 ir 8,06 GHz. Didėjant santykiui  $N_h / N$ , pagrindinio bangos tipo krizinis dažnis pamažu slenka žemesniųjų dažnių link.

Nuostolių grafikuose, pateiktuose 2, 4, 6 pav., matome, kad visame dažnių ruože pagrindinio bangos tipo nuostoliai  $h_p''$  yra mažesni negu aukštesniųjų bangos tipų nuostoliai  $h_a''$ . Priklausomai nuo sunkiųjų skylių koncentracijos, keičiasi santykio  $h_a'' / h_p''$  ekstremumų vertės ir jų padėtys dažnių ašyje  $f$ . Pavyzdžiui, kai  $N_h / N = 50 \%$ ,

maksimumas  $h_a'' / h_p'' = 60$  ( $f = 100$  GHz) ir minimumas  $h_a'' / h_p'' = 2,5$  ( $f = 200$  GHz).

Skirtingų bangos tipų dažninėse charakteristikose gali atsirasti daugiau nei vienas nuostolių rezonansas (4 pav.).

Kai sunkiųjų skylių koncentracija mažesnė kaip 30 %, 2-asis ir 3-iasis bangos tipai yra susipynę (1 pav.). Tada labai padidėja 3-iojo bangos tipo slopinimas (2 pav.). 2-asis ir 3-iasis bangos tipai transformuojasi ties 101,8 GHz dažniu, t. y. 2-asis bangos tipas virsta 3-uoju, o 3-iasis virsta 2-uoju.

Pirmojo ir antrojo aukštesnių bangos tipų dažninės charakteristikos susikerta ties 102 GHz dažniu, ir kai sunkių skylučių koncentracija yra didelė, vyksta šių bangos tipų transformacija (5 pav.).

Visi aptikti rezonansiniai efektai yra susiję su puslaidininkio kompleksinės santykinės dielektrinės skvarbos tenzorius komponentų dažnine priklausomybe.

Mikrobangų įtaisai galėtų veikti platesniame darbo dažnių diapazone, kuris skaičiuojamas pagal tradicines formules (Asmontas *et al.* 2010), kadangi aukštesnieji bangos tipai nedaug pakeičia pagrindinės bangos sklaidimą bangolaidyje.

## Išvados

1. Sukurta programa, skirta nuostoliams girotropiniuose puslaidininkiniuose bangolaidžiuose skaičiuoti.
2. Išnagrinėtos *p*-Ge bangolaidžių, turinčių dviejų rūšių laisvuosius krūvininkus, devynių bangos tipų dispersinės charakteristikos 5–200 GHz dažnių ruože.
3. Ištirtose dažninėse charakteristikose pagrindinio bangos tipo nuostoliai yra bent du kartus mažesni negu aukštesniųjų bangos tipų nuostoliai.
4. Kai sunkiosios skylutės sudaro apie 50 % visų krūvininkų koncentracijos, 5–130 GHz dažnių ruože pagrindinio bangos tipo nuostoliai yra nuo 6 iki 60 kartų mažesni negu aukštesniųjų bangos tipų nuostoliai. Ši savybė galėtų būti panaudota, siekiant praplėsti mikrobangų įtaisų darbo dažnių diapazoną (plačiaujustiškumą).

## Literatūra

- Asmontas, S.; Nickelson, L.; Bubnelis, A.; Martavicius, R.; Skudutis, J. 2010. Hybrid mode dispersion characteristic dependencies of cylindrical dipolar glass waveguides on temperatures, *Electronics and Electrical Engineering* 106(10): 83–86.
- Ballato, J.; Hawkins, T.; Foy, P.; Morris, S.; Hon, N. K.; Jalali, B.; Rice, R. 2011. Silica-clad crystalline germanium core optical fibers, *Optics Letters* 36(5): 687–688. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.36.000687>
- Baynham, A. C. 1968. Magnetoplasma wave propagation in the two-carrier system provided by p-type semiconductors: a study of the transport properties of p-type germanium using magnetoplasma waves, *J. Phys. C: Solid State Phys.* 2(1): 1447–1454. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3719/1/5/334>
- Eden, J. G.; Park, S. J.; Ostrom, N. P.; Chen, K. F. 2005. Recent advances in microcavity plasma devices and arrays: a versatile photonic platform, *J. Phys. D: Applied Physics* 38(11): 1644–1648. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/11/002>
- Hubers, H. W.; Pavlov, S. G.; Shastin, V. N. 2005. Semiconductor science and technology, *IOP Publishing* 20(7): 211–221.

- Iqbal, S. S.; Gibson, A. A. 2001. Characteristics of millimeter-wave semiconductor phase shifters, in *The 11<sup>th</sup> International Conference on Antennas and Propagation, April 17–20, 2001, Conference Publication No 480*, 323–326.
- Liu, S.; Li, L. W.; Leong, M. S.; Yeo, T. S. 2000. Theory of gyroelectric waveguides, *PIER* 29: 231–259. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER00041801>
- Mališauskas, V.; Plonis, D. 2010. Dispersion characteristics of the propagation waves in the gyroelectric semiconductor waveguides, *Electronics and Electrical Engineering* 106(10): 87–90.
- Nickelson, L.; Asmontas, S.; Malisaukas, V.; Shugurov, V. 2007. *The Open Cylindrical Gyrotropic Waveguides*. Vilnius: Technika. 248 p. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022377808007307>
- Nickelson, L.; Asmontas, S.; Malisaukas, V.; Martavicius, R. 2009. The dependence of open cylindrical magnetoactive p-Ge and p-Si plasma waveguide mode cutoff frequencies on hole concentrations, *Journal of Plasma Physics* 75: 35–51.
- Palik, E. D.; Furdyna, J. K. 1970. Infrared and microwave magnetoplasma effects in semiconductors, *Reports Progress in Physics* 33(3): 1193–1322. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/33/3/307>
- Prati, E. 2003. Propagation in gyroelectromagnetic guiding systems, *J. of Electromagn. Waves and Appl.* 17(8): 1177–1196. <http://dx.doi.org/10.1163/156939303322519810>
- Sujuki, N.; Yokoshima, S. 2003. *Plasma processing apparatus having circular waveguide and plasma processing method*. United States Patent 6652709.

## MAGNETOACTIVE *p*-Ge ROD WAVEGUIDE LOSS ANALYSIS ON THE CONCENTRATION OF TWO COMPONENT HOLE CHARGE CARRIERS

A. Bubnelis

Abstract

A new algorithm is utilized to examine the phase and attenuation constants of open dissipative epsilon- and (or) mu-gyrotropic rod waveguides. Our algorithm allows analyzing the waveguides made of materials having very high losses. The dispersion characteristics of *p*-Ge with a waveguide of two component hole charge carriers are calculated when the ratio of heavy hole concentration in the material is equal to 5%, 50% and 95% of the total free carrier concentration. The effective mass of *p*-Ge heavy and light holes are 0.279 $m_e$  and 0.043 $m_e$  respectively. The dispersion characteristics of the main and eight higher modes are presented in the paper. The transformation of higher hybrid modes at some heavy hole concentrations can be noticed. Waveguide broad bandwidth can be considerably extended due to the fact that the losses of higher modes are larger in comparison to those of the main mode at certain heavy hole concentration.

**Keywords:** gyrotropic, gyroelectric waveguides, *p*-Ge, semiconductor plasma, light and heavy holes, loss, dispersion characteristics, tensor of semiconductor permittivity, constant magnetic field, complex longitudinal propagation constant.