

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY
STATE RESEARCH INSTITUTE
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Tatjana GRIC

**ELECTROMAGNETIC FIELD AND
DISPERSION CHARACTERISTIC
CALCULATIONS OF OPEN
WAVEGUIDES MADE OF
ABSORPTIVE MATERIALS**

**SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION
PHYSICAL SCIENCES, PHYSICS (02P),
CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE;
ELECTRICAL, MAGNETIC AND OPTICAL PROPERTIES;
SUPERCONDUCTORS; MAGNETIC RESONANCE;
RELAXATION; SPECTROSCOPY (P260)**



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2011

Doctoral dissertation was prepared at State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology in 2009–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Liudmila NICKELSON (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P).

Consultant

Prof Dr Artūras JUKNA (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Physics at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Algirdas SUŽIEDĖLIS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P).

Members:

Prof Dr Habil Jūras BANYS (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P),

Prof Dr Algirdas BAŠKYS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Vytautas KLEIZA (Kaunas University of Technology, Physical Sciences, Mathematics – 01P),

Prof Dr Vidmantas REMEIKIS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P).

Opponents:

Prof Dr Habil Viktoras ŠUGUROVAS (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P),

Assoc Prof Dr Vytautas URBANAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Physics in the Hall of Semiconductor Physics Institute of State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology at 1 p. m. on November 25, 2011.

Address: A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt.

The summary of the doctoral dissertation was distributed on October 24, 2011.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania) and at the Library of the Semiconductor Physics Institute of State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology (A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius).

© Tatjana Gric, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
VALSTYBINIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ INSTITUTAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Tatjana GRIC

ELEKTROMAGNETINIŲ LAUKŲ IR
DISPERSINIŲ CHARAKTERISTIKŲ
SKAIČIAVIMAI ATVIRUOSIUOSE
BANGOLAIDŽIUOSE IŠ
SPINDULIUOTĘ SUGERIANČIŲ
MEDŽIAGŲ

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA
FIZINIAI MOKSLAI, FIZIKA (02P),
KONDENSUOTOS MEDŽIAGOS: ELEKTRONINĖ STRUKTŪRA,
ELEKTRINĖS, MAGNETINĖS IR OPTINĖS SAVYBĖS,
SUPERLAIDININKAI, MAGNETINIS REZONANSAS,
RELAKSACIJA, SPEKTROSKOPIJA (P260)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2011

Disertacija rengta 2009–2011 metais Valstybiniame mokslinių tyrimų institute Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Liudmila NICKELSON (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Konsultantas

prof. dr. Artūras JUKNA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. dr. Algirdas SUŽIEDĖLIS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Nariai:

prof. habil. dr. Jūras BANYS (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Vytautas KLEIZA (Kauno technologijos universitetas, fiziniai mokslai, matematika – 01P),

prof. dr. Vidmantas REMEIKIS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Oponentai:

prof. habil. dr. Viktoras ŠUGUROVAS (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

doc. dr. Vytautas URBANAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2011 m. lapkričio 25 d. 13 val. Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro Pუსlaidininkų fizikos instituto salėje, 206 kab.

Adresas: A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius, Lietuva.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; faksas +370 5 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2011 m. spalio 24 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva) bei Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro Pუსlaidininkų fizikos instituto (A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius, Lietuva) bibliotekose.

VGТУ leidyklos „Technika“ 1911-M mokslo literatūros knyga.

© Tatjana Gric, 2011

Introduction

The formulation of the problem

Nowadays there is a tendency to use the new functional materials for microwave electronic devices. Based on materials functionality the microwave devices with the specific characteristics are created. The artificially created metamaterials and the broad-bandwidth semiconductor materials, for example SiC, are the modern and widely used.

The SiC waveguides operating at the microwave frequency range can be used at the high temperature, high power and the high radiation conditions. The SiC material has better properties, compare with silicon, and suitable for the high power electronics. The technology potential of the metamaterials is very large today. The proposed metamaterials with the exclusive electrodynamic properties, like those of the effective permittivity and permeability, which both can be negative at the same time, can help us to overcome number of technical obstacles appearing while using regular materials for microwave applications. We should pay attention at the fact that the permittivity and permeability of mentioned materials are complex numbers with sufficiently large imaginary parts. For detailed investigation of the SiC waveguides and waveguides made of metamaterials needs to create the approbated algorithms for calculations of waveguide structures made of materials with large losses. In addition, one needs to analyze the solution of the Helmholtz equation with certain boundary conditions in the situation when the materials are characterized by the anomalous dispersion.

The topicality of research

A number of scientific works describing the EM wave propagation through the metamaterial waveguides with intricate shapes of the cross-sections, i. e. circular, square or more complicated shapes, is limited.

The number of scientific works analyzing the SiC waveguides is also limited. The main reason that even in modern research-laboratories, to investigate experimentally the large-loss making materials and their properties dependence upon temperature is difficult.

This work proposes results of simulation of the dispersion characteristics and electromagnetic field distributions in the 2D open SiC and metamaterial waveguides. Our calculations are in good agreement with many results from published scientific sources, including and experimental results. Numeric values of the complex permittivity and permeability have been taken from the experimental data of other authors. Our results are new and original. Similar investigations have not been made by other authors.

The object of the research

The object of the research is the waveguide made of absorptive materials.

The aim of the work – to find the peculiarities of the electrodynamical characteristics and to define the areas of their applications in the microwave devices.

The tasks of the work

1. To create the algorithms and to fulfil the electrodynamical analysis of the open waveguides, made of modern materials (SiC, metamaterial) with anomalous dispersion and very high losses. The electrodynamical analysis is based on calculations of the dispersion characteristics and electromagnetic field distributions. The Maxwell's equations are solved rigorously and all the boundary conditions are satisfied.
2. To create algorithms and to fulfil the investigations of the 2D and 3D electric and magnetic field distributions of the guided modes.
3. To analyze the dispersion characteristics of the main and the first-higher modes propagating in the investigated waveguides.

Methodology of research

The Singular Integral equations', the partial area methods were used. These methods allow us to solve boundary problems. The Muller's method was used in order to find the complex roots of the dispersion equations. The computer algorithms were created in Matlab.

Scientific novelty

1. The algorithms for calculations of the dispersion characteristics and electromagnetic field distributions of the modes propagating in the waveguides made of materials absorbing energy and having the anomalous dispersion were created and presented in current work. In the last case the problem solution is modified. We have found out that the two dimensional problem solution in the frequency range with the anomalous dispersion does not agree with the solution in the frequency range with the normal metamaterial dispersion. The problem solution was found when all the electrodynamical conditions were satisfied, including condition at the waveguide edge (for waveguides having edges) and at the infinity, i. e. the components of the electromagnetic field approached to the zero at the infinity.
2. We have found out that the slow and fast modes are the same analyzing the number of the electric field variations by the waveguide radius. It is important classifying the waveguide modes.

3. The construction of the modulator was created on the basis of the SiC waveguide electro-dynamical characteristics (the Lithuanian patent Nr. 5710).

Practical value

The obtained research results can be useful for creating of the microwave electronic devices, for example, filters, modulators, phase shifters, absorbers. The created algorithms are useful in order to investigate the absorptive material waveguides of the complicated cross-shapes.

Defended propositions

1. The created algorithms can be used for calculation of the dispersion characteristics and 2D and 3D distributions of EM field in the rectangularly and circularly shaped waveguides made of semiconductors and metamaterials absorbing the EM waves. All the boundary conditions are satisfied.
2. The EM wave signals of narrow 2.5 GHz frequency range propagating along the open metamaterial waveguides ($r = 2.5$ mm) are absorbed. The losses of the EM wave propagating through the band-stop filter at the passing frequency range (75–100, 102.5–115 GHz) are 100 times less than losses at the absorbing frequency range (100–102.5 GHz).
3. The losses of the rectangular SiC waveguide with the side of the cross-section equal to $2r$ are 2.5 times smaller than losses of the circular SiC waveguide with radius r . The main reason of the small losses at the rectangular SiC waveguides is the increased concentration of the EM field of the guided wave at the waveguide edges and outside the waveguide. By this reason the major part of the EM energy propagates outside the waveguide and the value of losses decreases.
4. The losses of the circular SiC waveguide stay constant at the 30–70 GHz frequency range. The phase of the EM wave may be regulated changing the temperature from 500 till 1500 °C. Such waveguide may be used creating the modern modulators, phase shifters or other elements of the microwave technique in order to transfer the EM waves with the smallest losses.

The scope of the scientific work

The scientific work consists of the general characteristic of the dissertation, 3 chapters, conclusions, list of references, list of author's publications. The total scope of the dissertation is 94 pages, 35 pictures, 5 tables.

1. The rigorous solution of the electrodynamical boundary problem if there are waveguide regions filled with the absorbing materials. The analysis of literature.

A number of scientific works describing the EM wave propagation through the metamaterial waveguides with intricated shapes of the cross-sections, i. e. circular, square or more complicated shapes, is limited. The 1D waveguides are researched by Alu, Kim.

The number of scientific works analyzing the SiC waveguides is also limited. The main reason that even in modern research-laboratories, to investigate experimentally the large-loss making materials and their properties dependence upon temperature is difficult.

The expressions of all the electric field components which satisfy the boundary conditions by all the waveguide contours dividing the different waveguide materials are presented below. We apply the Krylov-Bogoliubov method whereby the contour L is divided into n segments and the integration along a contour L is replaced by a sum of integrals over the segments $j=1\dots n$. The expressions of all electric field components for the area S^+ (the inner area of counter L) and S^- (the outer area of counter L) are presented below:

$$E_z^+ = \sum_{j=1}^n \mu_e^+(s_j) \int_{\Delta L} H_0^{(2)}(k_{\perp}^+ r') ds \quad (1)$$

$$E_z^- = \sum_{j=1}^n \mu_e^-(s_j) \int_{\Delta L} H_0^{(2)}(k_{\perp}^- r') ds \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (E_x)^+ = & -i\mu_0\mu_r^{\text{SiC}} \omega / \left(k_{\perp}^+\right)^2 \left[k_{\perp}^+ \sum_{j=1}^n \left(\mu_h^+(s_j)\right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_{\perp}^+ r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \\ & + ih / \left(k_{\perp}^+\right)^2 \left[k_{\perp}^+ \sum_{j=1}^n \left(\mu_e^+(s_j)\right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_{\perp}^+ r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right] - \frac{2\mu_0\mu_r^{\text{SiC}} \omega \cos\theta}{\left(k_{\perp}^+\right)^2} \mu_h^+(s_j) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
(E_y)^+ &= -ih / (k_\perp^+)^2 \left[k_\perp^+ \sum_{j=1}^n \left(\mu_e^+(s_j) \right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^+ r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \\
&- i\mu_0 \mu_r^{\text{SiC}} \omega / (k_\perp^+)^2 \left[k_\perp^+ \sum_{j=1}^n \left(\mu_h^+(s_j) \right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^+ r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right] \\
&- \frac{2\mu_0 \mu_r^{\text{SiC}} \omega \cos\theta}{(k_\perp^+)^2} \mu_h^+(s_j)
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
(E_x)^- &= -i\mu_0 \mu_r^a \omega / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n \left(\mu_h^-(s_j) \right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \\
&+ ih / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n \left(\mu_e^-(s_j) \right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right] + \frac{2\mu_0 \mu_r^a \omega \cos\theta}{(k_\perp^-)^2} \mu_h^-(s_j)
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
(E_y)^- &= -ih / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n \left(\mu_e^-(s_j) \right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \\
&- i\mu_0 \mu_r^a \omega / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n \left(\mu_h^-(s_j) \right) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right] \\
&+ \frac{2\mu_0 \mu_r^a \omega \cos\theta}{(k_\perp^-)^2} \mu_h^-(s_j)
\end{aligned} \tag{6}$$

Here $\mu_e(s_j)$ and $\mu_h(s_j)$ are functions at the same contour point are different for the field components in the areas S^+ and S^- , i.e. $\mu_h^+(s_j) \neq \mu_h^-(s_j)$. The magnitude $H_0^{(2)}$ is the Hankel function of the zeroth order and of the second kind, $H_1^{(2)}$ is the Hankel function of the first order and of the second kind. Here

complex magnitudes $k_{\perp}^+ = \sqrt{k^2 \epsilon_r^{\text{SiC}} \mu_r^{\text{SiC}} - h^2}$ and $k_{\perp}^- = \sqrt{h^2 - k^2 \epsilon_r^a \mu_r^a}$ are the transversal propagation constants of the SiC medium in the area S^+ and in the air area S^- , correspondingly. Here $h = h' - ih''$ is the complex propagation constant where h' is the phase constant and h'' is the attenuation constant (waveguide losses). The magnitude k is the wave number in a vacuum. The segment of the contour L is $\Delta L = L/n$, where the limits of integration in the formulae (1–6) are the ends of the segment ΔL . The angle θ is equal to $g \cdot 90^\circ$ with g from 1 till 4, if the contour of the waveguide cross-section is a rectangular one, as a result can be $\cos \theta = \pm 1$ and $\sin \theta = \pm 1$ in the formula (3–6).

We can obtain the transversal components of the magnetic field H_x and H_y using SIE method in the form analogical formulae (1)–(6).

After we know all EM wave component representations in the integral form we substitute the component representations to the boundary conditions. We obtain the homogeneous algebraic equations' system with the unknowns $\mu_e^+(s_j)$, $\mu_h^+(s_j)$, $\mu_e^-(s_j)$ and $\mu_h^-(s_j)$.

The condition of solvability is obtained by equalizing the determinant of the complex system to zero. The roots of the system let us to determine the complex propagation constants of the main and higher modes of the waveguide. For finding the complex roots of the complex determinant we have used the Müller's method. Müller's method uses 3 initial guesses x_0 , x_1 , x_2 and determines the intersection with the x axis of a parabola. Note that this is done by finding the root of an explicit quadratic equation. After obtaining the propagation constant of some required mode the determination of the electric and magnetic fields of the mode becomes possible. For the correct formulated problem the solution is one-valued and stable with respect to small changes of the coefficients and the contour form.

2. The electro-dynamical analysis of the circular waveguides

We analyze the circular metamaterial waveguide. Its radius is 2.5 mm. The dispersion characteristics are presented in Fig. 1. The main mode is denoted with points and the first higher one – with circles. In Fig. 1 (a) we see that the dependences of the normalized phase constants upon frequency are smooth, except the distortions of lines observed at 97–102 GHz frequency range.

In Fig. 1 (b) we see that the losses of the main mode are the largest when the frequency is 101.25 GHz.

We analyze the circular SiC waveguide with radius 3 mm at temperature

$T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. The permittivity of the SiC material at this temperature is $\epsilon_r = 7-i$, when the EM wave frequency is $f=11\text{ GHz}$. The dependences of the phase constants and losses upon frequency are presented in Fig. 2.

The dispersion characteristics of the main and the first higher modes propagating in the circular SiC waveguide with radius 2.5 mm at three different temperatures are presented in Fig. 3.

The permittivity of the SiC material at $f=11\text{ GHz}$ is $\epsilon_r = 6.5-i0.5$, when $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon_r = 7-i$, when $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\epsilon_r = 8-i2$, when $T=1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. The value of the phase constant increases when the frequency increases (see Fig. 3). Comparing the dependences of the phase constants upon frequency we see that the larger temperature the larger values of the phase constants are.

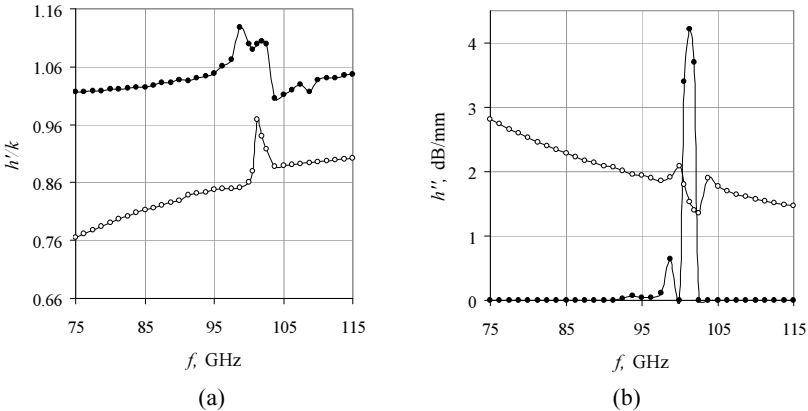


Fig. 1. The dispersion characteristics of the circular waveguide made of metamaterial: (a) – the dependences of the normalized propagation constants upon frequency; (b) – the dependences of the attenuation constants (losses) upon frequency. The main mode is denoted by points and the first higher mode by circles

The losses of the EM wave increase when the temperature increases. When the frequency is larger than 20 GHz, the losses are close to constant. The got results are useful creating the modern signal modulators and phase shifters. The amplitude of the EM wave does not change modifying the frequency, because the losses are closed to constant.

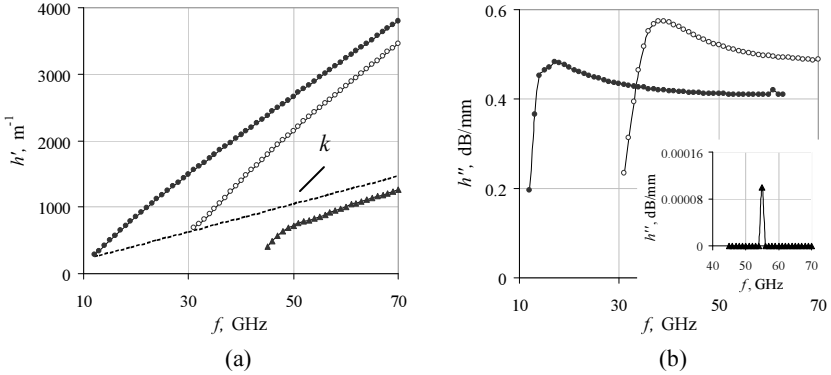


Fig. 2. The dispersion characteristics of the propagating wave in the SiC waveguide: (a) – dependences of the phase constants; (b) – dependences of the attenuation constants (i.e. losses) upon frequency. The main mode is denoted by the point symbols, the first higher mode – by the circles, the fast mode – by the triangles

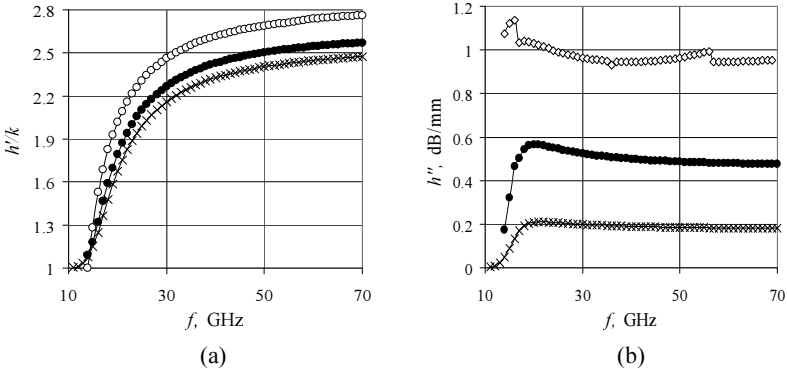


Fig. 3. The dispersion characteristics of the main mode of the circular SiC waveguide: (a) – dependences of the normalized phase constant upon frequency at temperature 500 °C (solid line with crosses), 1000 °C (solid lines with black points) and 1500 °C (solid line with circles); (b) – losses calculated for the same temperatures.

Comparing the metamaterial waveguides with different radiuses, we see that the metamaterial waveguide with radius $r = 2.5$ mm is more useful for creation of the filter than the metamaterial waveguide with radius $r = 2$ mm. The losses of the first higher mode propagating in the waveguide with smaller radius change chaotically. Thus the main mode could be modulated.

3. The electrodynamical analysis of the rectangular waveguides

The dispersion characteristics of the rectangular SiC waveguide ($6 \times 6 \text{ mm}^2$) at the temperature $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ are presented in Fig. 4.

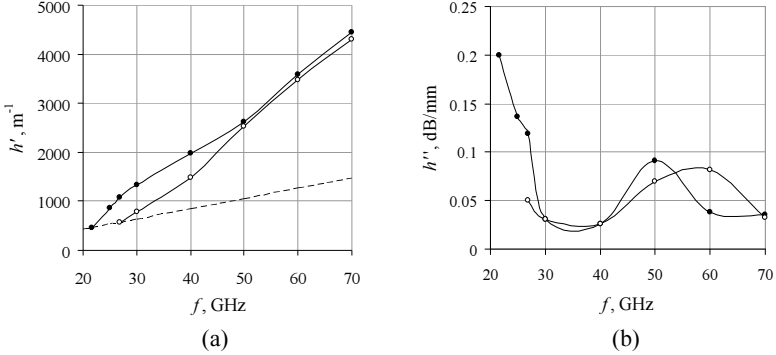


Fig. 4. Dispersion characteristics of the main and the first-higher modes of the SiC waveguide with the square ($6 \times 6 \text{ mm}^2$) cross-section: (a) – the phase constants and (b) – the attenuation constants (losses) upon frequency dependences. The main mode is denoted by line connected points and the first-higher-mode is denoted by line-connected-circles.

The dispersion characteristics of the main and the first higher mode propagating in the rectangular SiC waveguide are presented in Fig. 4. The losses of the main and the first higher modes are not the monotonically changeable functions (see Fig. 4). When the EM wave frequency is $f < 30 \text{ GHz}$, the losses of the main mode are larger than the losses of the first higher mode. When the frequency is $30 \text{ GHz} < f < 40 \text{ GHz}$, the losses of the both modes are almost the same. When the frequency is $f > 40 \text{ GHz}$, the losses of the both modes change in a different manner. The main is the hybrid mode HE_{11} and the first higher mode is the EH_{11} mode.

Comparing the losses of the circular waveguide ($r = 3 \text{ mm}$), made of SiC, with losses of the rectangular waveguide, we see that the losses of the modes propagating in the rectangular waveguide are smaller.

General conclusions

1. The open waveguides on the basis of absorptive materials with different shapes of the cross-section can be investigated using the created computer algorithms. We are able to calculate the dispersion character-

- istics and 2D and 3D electromagnetic field distributions. These results can be very useful constructing the waveguide device.
2. The created computer algorithms were used investigating the waveguides made of the new materials. i. e. metamaterials, SiC. The got results are in good agreement with the well known electrodynamical laws. By this way the created computer software could be used investigating waveguides made of different materials.
 3. The circular metamaterial waveguides ($r = 2 \text{ mm}$, $r = 2.5 \text{ mm}$) could be used as filters. However the losses of the first higher mode propagating in the waveguide with the smaller radius change in an irregular manner. By this reason the main mode could be modulated in the smaller waveguides.
 4. The circular SiC waveguide ($r = 2.5 \text{ mm}$) could be used as modulator. The wave phase could be modulated changing the temperature of the waveguide.
 5. Changing the dimensions of the periodical waveguide, i.e. the dimensions of the air holes and their dimensions, we can reach the suitable electrodynamical characteristics of the waveguide, i.e. the dispersion characteristics and electromagnetic field distributions.

List of Published Works on the Topic of the Dissertation In the reviewed scientific periodical publications (ISI Web of Science)

Gric, T.; Nickelson, L. 2011. Electrodynamic investigation of the photonic waveguide structure. *Electronics and Electrical Engineering*, 111(5): 1–4. ISSN 1392-1215.

Gric, T.; Nickelson, L.; Asmontas, S. 2010. Electrodynamic characteristic particularity of open metamaterial square and circular waveguides, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER109: 361–379. ISSN: 1070-4698 (print), E-ISSN: 1559-8985 (online), doi: 10.2528/PIER10082505.

Asmontas, S.; Nickelson, L.; Gric, T. 2009. Electric field distributions in the open cylindrical silicon carbide waveguides, *Acta Physica Polonica A* 115(6): 1160–1161. ISSN 0587-4254.

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S. 2009. Electric field distributions of the fast and slow modes propagated in the open rod SiC waveguide, *Electronics and Electrical Engineering* 93(5): 87–90. ISSN 1392-1215.

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S.; Martavicius, R. 2008. Electrodynamic analyses of dielectric and metamaterial hollow-core cylindrical waveguides, *Electronics and Electrical Engineering* 82(2): 3–8. ISSN 1392-1215.

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S. 2007. Dispersion characteristics of metamaterial hollow-core cylindrical waveguide, *Lithuanian Journal of Physics* 47(3): 273–278. ISSN 1392-1932.

In the other editions

Gric, T.; Nickelson, L.; Asmontas, S. 2010. Three dimensional magnetic field distributions and dispersion characteristics of rectangular and circular SiC waveguides, in *The 4th Microwave & Radar Week: 18th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2010: Selected Papers*, vol. 2. June 14–16, 2010, Vilnius, Lithuania, 722–725. ISBN 978-9955-690-20-7, IEEE Catalog Number CFP10784-PRT.

Gric, T.; Asmontas, S.; Nickelson, L. 2010. 3D vector electric field distributions and dispersion characteristics of open rectangular and circular metamaterial waveguides, in *The 4th Microwave & Radar Week: 18th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2010: Selected Papers*, vol. 2. June 14–16, 2010, Vilnius, Lithuania, 578–581. ISBN 978-9955-690-20-7, IEEE Catalog Number CFP10784-PRT.

Ašmontas, S.; Nickelson, L.; Gric, T.; Galwas, B. A. 2009. Solution of Maxwell's Equations by the Partial Area Method for the Electrodynamical Analyses of Open Lossy Metamaterial Waveguides, in *The International Conference „Differential Equations and their Applications. DETA2009“*: Selected Papers: September 10–12, 2009, Kaunas, Lithuania, 17–20. ISBN 978-9955-25-747-9 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Asmontas, S.; Gric, T.; Martavicius, R. Analysis of Slow and Fast Modes of Lossy Ceramic SiC Waveguides, in *The Progress in Electromagnetics Research Symposium: “PIERS2009”*: Selected Papers, vol. 1&2. August 12–21, 2009, Moscow, Russia, 573–576. ISSN 1159-9450 (Thomson ISI Proceedings).

Asmontas, S.; Nickelson, L.; Gric, T.; Martavicius, R. 2009. Electric field distributions in the cross-sections of the SiC hollow-core waveguides, in *The 17th IEEE International Pulsed Power Conference*: Selected Papers, vol. 1&2. June 28–July 2, 2009, Washington, USA, 507–510. IEEE/IEE, ISBN 9781424440658. Library of Congress: 2009901215 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S.; Martavicius, R. 2009. Analyses of the Gyroelectric Plasma Rod Waveguide, in *The 17th IEEE International Pulsed Power Conference*: Selected Papers, vol. 1&2. June 28–July 2, 2009, Washington, USA, 724–727. IEEE/IEE, ISBN 978-1-4244-40658. Library of Congress: 2009901215 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Gric, T. 2008. Dispersion characteristics and electric field distributions of modes propagating in the open electrically gyrotropic semiconductor rod waveguide, *The 17th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–*

2008: Selected Papers, vol. 2. May 19–21, 2008, Wroclaw, Poland, 501–504. IEEE Catalog Number: CFP08784-PRT, ISBN 13: 978-1-4244-3122-9 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Galwas, B. A.; Gric, T.; Ašmontas, S. 2008. Electric field distributions in the cross-sections of the metamaterial hollow-core and rod waveguides, *The 17th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2008: Selected Papers*, vol. 2. May 19–21, 2008, Wroclaw, Poland, 497–500 (Thomson ISI Proceedings).

The patent

Gric, T.; Nickelson, L. & Asmontas, S. 2010-11-25, Waveguide Modulator. Lietuvos Respublikos patentas Nr. LT 5710. Application of Invention 2010-040 is given in *Official bulletin of the state patent bureau of the republic of Lithuania* 2010/11, ISSN 1648-9985.

The reviewed chapter of the scientific monograph

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S. 2011. Chapter 6. pages 115–141: Electrodynamical modelling of open cylindrical and rectangular carbide waveguides of book "Properties and applications of Silicon Carbide", ISBN 978-953-307-201-2, Edited by: Rosario Gerhardt, Hard cover, 535 pages, Publisher: InTech, Publication date: April 2011.

About the author

Tatjana Gric was born in Vilnius, on May 30, 1985. First degree in Electronic Engineering, Faculty of Electronic Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2007. Master of Science in Electronic Engineering, Faculty of Electronic Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2009 (the degree with distinction). In 2009–2011 – PhD student of Semiconductor Physics Institute (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology). Tatjana Gric won the second price at the young scientist contest of the 18th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, MIKON–2010. Tatjana Gric got the certificate of merit from the Lithuanian Academy of Sciences in 2008.

ELEKTROMAGNETINIŲ LAUKŲ IR DISPERSINIŲ CHARAKTERISTIŲ SKAIČIAVIMAI ATVIRUOSIUOSE BANGOLAIDŽIUOSE IŠ SPINDULIUOTŲ SUGERIANČIŲ MEDŽIAGŲ

Problemos formulavimas

Naujų medžiagų pagrindu kuriami naujos kartos elektroniniai įrenginiai, turintys novatoriškų specifinių charakteristikų. Prie moderniausių ir plačiai taikomų medžiagų priskirtinos dirbtinai sukurtos metamedžiagos ir puslaidininkių medžiagos su plačia draudžiamosios energijos juosta, pvz. silicio karbidą (SiC).

SiC bangolaidžiai, veikiantys mikrobangų dažnių ruože, gali būti taikomi, esant aukštų temperatūrų, didelių galių, aukštos radiacijos sąlygoms. SiC medžiaga turi labai geras savybes, tinkančias aukštų galių elektronikai, lyginant su silicio medžiaga. Šiandieninis metamedžiagų technologinis potencialas – labai didelis. Unikalioms metamedžiagų elektrodinaminės savybės, tokios kaip neigiamos efektingos dielektrinė ir magnetinė skvarbos, gali pakeisti bangolaidžiuose naudojamas šiuolaikines medžiagas, kurių technologija ir sudėtinga ir santykinai brangi superaukštųjų ir ypač aukštųjų dažnių diapazonuose. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad minėtų medžiagų dielektrinė ir magnetinė skvarbos yra kompleksiniai skaičiai, kurių menamosios dalys gali būti labai didelės. Bangolaidžių, iš minėtų medžiagų, elektrodinaminei analizei reikia turėti gerai apčiuotus algoritmus, kurie įvertina EM bangų nuostolius medžiagoje, o taip pat atsižvelgia į Helmholtzo lygties sprendinius.

Darbo aktualumas

Straipsnių, kuriuose nagrinėjamas EM (elektromagnetinės) bangos sklidimas sudėtingos skerspjūvio formos, pvz. apskritosios, stačiakampės, metamedžiaginės struktūrose, skaičius šiandien ribotas.

Darbu, susijusių su SiC bangolaidžių skaičiavimais, nedaug. Pagrindinė eksperimentinių tyrimų problema – intensyvi EM bangų sugertis bangolaidžiuose ir sugerties priklausomybė nuo temperatūros.

Daugelio 2D atvirųjų SiC ir metamedžiagos bangolaidžių dispersinių charakteristikų ir EM laukų pasiskirstymai prof. L. Nickelson ir T. Gric skaičiuojami jau nuo 2006 metų. Skaičiavimų rezultatai labai gerai sutampa su eksperimentiniais rezultatais. Šiame disertaciniame darbe medžiagų kompleksinių santykinių dielektrinės ir magnetinės skvarbų eksperimentinės reikšmės, priklausančios nuo dažnio ir temperatūros, buvo imamos iš kitų autorių publikuotų mokslinių darbų. Pagal turimus duomenis atlikti bangolaidžių skaitiniai tyrimai yra unikalūs ir nebuvo atlikti kitų mokslininkų.

Tyrimų objektas – bangolaidžiai, pagaminti iš EM spinduliuotę sugeriančių medžiagų.

Darbo tikslas – nustatyti atvirųjų bangolaidžių elektrodinaminių charakteristikų ypatumus ir nurodyti tų ypatumų pritaikymus naujos kartos mikrobanginės technikos įrenginiuose.

Darbo uždaviniai

1. Sukurti algoritmus ir atlikti atvirųjų (neekranuotų) bangolaidžių, pagamintų iš modernių medžiagų, tokių kaip SiC ar metamedžiaga, ir pasižyminčių anomalią dispersiją ir stiprią EM bangų sugertimi, elektrodinaminę analizę. Suskaičiuotos dispersinės charakteristikos ir EM laukų pasiskirstymai yra tiriami, kai Maxwello lygtys sprendžiamos tenkinant visas kraštines sąlygas.
2. Sukurti algoritmus ir atlikti EM bangų, sklindančių atviraisiais bangolaidžiais, modų 2D ir 3D elektrinių ir magnetinių laukų tyrimus.
3. Išanalizuoti EM bangų pagrindinių modų ir pirmųjų aukščiausiųjų modų, sklindančių tiriamaisiais bangolaidžiais, dispersines charakteristikas.

Tyrimų metodika

Siekiant išspręsti elektrodinaminius uždavinius, darbe buvo taikomas *Singularinių integralinių lygčių* metodas, dalinių sričių metodas. Pastarieji metodai leido išspręsti ribines užduotis. Siekinat surasti dispersinių lygčių kompleksines šaknis buvo naudojamas Mullerio metodas. Kompiuteriniai algoritmai buvo kuriami Matlabo aplinkoje.

Mokslinis naujumas

1. Darbe pasiūlyti dispersinių charakteristikų ir elektromagnetinių laukų pasiskirstymų skaičiavimų algoritmai, kuriais ištirti bangolaidžiai, pagaminti iš medžiagų, pasižyminčių įvairaus stiprio spinduliuotės sugertimi ir anomalią dispersiją. Nustatyta, jog dvimačio uždavinio sprendinys dažnių ruože, kuriame pasireiškia anomalioji metamedžiagos dispersija, nesutampa su sprendiniu dažnių ruože, kuriame pasireiškia normalioji metamedžiagos dispersija. Sprendinys buvo surastas, kai tenkinamos elektrodinaminės sąlygos bangolaidžio briaunoje ir begalybėje, t. y., kai elektromagnetinio lauko dedamosios begalybėje artėja prie nulio.
2. Nustatyta, kad lėtosios ir greitosios modos yra lygiavertės atžvilgiu elektrinių laukų variacijų pagal bangolaidžio spindulį, t. y. variacijų

pagal bangolaidžio spindulį skaičius nepriklauso nuo to, ar moda yra greitoji, ar lėtoji. Gautasis rezultatas svarbus, klasifikuojant bangolaidžių modas.

3. Gautų SiC bangolaidžių elektrodinaminių charakteristikų pagrindu buvo sukurta modulatoriaus konstrukcija ir paskelbtas Lietuvos Respublikos patentas Nr. 5710.

Praktinė vertė

Darbe gauti rezultatai gali būti naudojami siekiant sukurti bangolaidinius įrenginius, pavyzdžiui, filtrus, modulatorius, fazės suktuvus, sugėriklius. Sukurtus algoritmus galima naudoti, norint tirti bet kurios skerspjūvio formos bangolaidžius.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurtais skaitmeniniais algoritmais galima suskaičiuoti stačiakampio gretasienio ir apskrito skerspjūvių formų bangolaidžių, pagamintų iš EM bangas sugeriančių puslaidininkių ir metamedžiagų, dispersines charakteristikas ir 2-D bei 3-D EM laukų pasiskirstymus, įskaitant visas uždavinių kraštines sąlygas.
2. Atvirasis apskritasis metamedžiagos bangolaidis ($r = 2,5$ mm) slopina siauros (2,5 GHz) dažnių juostos EM bangų signalus. EM bangų sklindimo nuostoliai, tokio juostinio filtro praleidžiamų dažnių srityje (75–100, 102,5–115 GHz) per 100 kartų mažesni, nei nuostoliai spinduliuotę sugeriančiame dažnių ruože (100–102,5 GHz).
3. Stačiakampiuose SiC bangolaidžiuose, kurių skerspjūvio kraštinių ilgiai lygūs $2r$, nuostoliai 2,5 karto mažesni nei r -spindulio apskrituose SiC bangolaidžiuose. Pagrindinė mažų nuostolių stačiakampiuose SiC bangolaidžiuose priežastis – padidėjusi sklindančiosios modos EM lauko koncentracija bangolaidžio kampuose (briaunose) ir už bangolaidžio ribų. Dėl to didesnė EM energijos dalis sklinda už bangolaidžių ribų ir nuostoliai mažėja.
4. SiC apskritojo bangolaidžio nuostoliai nekinta dažnių ruože nuo 30 iki 70 GHz. Bangolaidžiu sklindančios EM bangos fazę galima valdyti bangolaidžio temperatūra, jai kintant intervale 500–1500 °C. Toks bangolaidis gali būti pritaikytas kuriant modernius modulatorius, fazės suktuvus ar kitas mikrobanginės technikos elementus, skirtus EM bangų perdavimui.

Darbo apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Darbo apimtis yra 94 puslapiai, tekste panaudotos 24 numeruotos formulės, 35 paveikslai ir 5 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 20 literatūros šaltinių.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros, metodų, naudojamų bangolaidinių įrenginių analizei, apžvalgai. Taip pat jame pateiktas algoritmų, sukurtų aptartų metodų pagrindų, aprobavimas.

Antrajame skyriuje pateikti apskritųjų cilindrinų bangolaidžių, pagamintų iš SiC ir metamedžiagų elektrodinaminės analizės rezultatai. Apskritieji metamedžiagos bangolaidžiai ($r = 2$ mm, $r = 2,5$ mm) gali būti naudojami kaip filtrai. Tačiau mažesniojo spindulio apskrituoju metamedžiagos bangolaidžiu sklindančios pirmosios aukštesniosios modos nuostoliai kinta chaotiškai, keičiantis dažniui. Dėl šitos priežasties siauresniuose bangolaidžiuose gali būti moduluojama pagrindinė moda.

Trečiajame skyriuje sudėtingos skerspjūvio formos bangolaidžių, pagamintų iš SiC ir metamedžiagų elektrodinaminės analizės rezultatai. Lyginant apskritojo bangolaidžio ($r = 3$ mm), pagaminto iš SiC, nuostolius su stačiakampio bangolaidžio, į kurį galima įbrėžti apskritąjį, nuostoliais, matome, jog modų sklindančių stačiakampiame bangolaidyje nuostoliai yra mažesni.

Bendrosios išvados

1. Sukurta programine įranga gali būti tiriami bet kurios skerspjūvio formos bangolaidžiai, pagaminti iš spinduliuotę sugeriančių medžiagų. Taip pat galima skaičiuoti bangolaidžių dispersines charakteristikas ir 2D ir 3D elektromagnetinių laukų pasiskirstymus. Gauti tyrimų rezultatai svarbūs, kadangi jie yra pagrindinės bangolaidžių charakteristikos, praktiškai konstruojant bangolaidinį prietaisą.
2. Sukurti programiniai algoritmai buvo pritaikyti, tiriant bangolaidžius, pagamintus iš naujų medžiagų, tokių kaip metamedžiagos, SiC. Nustatyta, kad tyrimų rezultatai neprieštarauja bendriems elektrodinamikos dėsniams. Tai reiškia, kad sukurtos programos gali būti taikomos, siekiant atlikti bangolaidžių, pagamintų iš įvairių medžiagų, tyrimus.
3. Apskritieji metamedžiagos bangolaidžiai ($r = 2$ mm, $r = 2,5$ mm) gali būti naudojami kaip filtrai. Tačiau mažesniojo spindulio apskrituoju metamedžiagos bangolaidžiu sklindančios pirmosios aukštesniosios modos nuostoliai kinta chaotiškai, keičiantis dažniui. Dėl šitos priežasties siauresniuose bangolaidžiuose gali būti moduluojama pagrindinė moda.

4. Apskritasis bangolaidis, pagamintas iš SiC ($r = 2,5$ mm), gali būti naudojamas kaip moduliatorius. Bangos fazė gali būti moduluojama, keičiant bangolaidžio temperatūrą.
5. Keičiant periodinio bangolaidžio geometriją, t. y. keičiant ertmių padėtis bei jų matmenis, galima valdyti bangolaidžio elektrodi-namines charakteristikas, t. y. dispersines charakteristikas ir elektro-magnetinių laukų pasiskirstymus.

Trumpos žinios apie autorių

Tatjana Gric gimė 1985 m. gegužės 30 d. Vilniuje.

2007 m. įgijo elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2009 m. įgijo elektronikos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete (diplomas su pagyrimu). 2009–2011 m. – Puslaidininkų fizikos instituto (Valstybinio mokslinių tyrimų instituto fizinių ir technologijos mokslų centro) doktorantė. Laimėjo antrąją vietą MIKON 2010 jaunųjų mokslininkų konkurse. Lietuvos mokslų akademijos prezidiumu apdovanota pagyrimo raštu už 2008 m. Aukštųjų mokyklų studentų mokslinių darbų konkursui pateiktą darbą.

Tatjana GRIC

ELECTROMAGNETIC FIELD AND DISPERSION CHARACTERISTIC
CALCULATIONS OF OPEN WAVEGUIDES
MADE OF ABSORPTIVE MATERIALS

Summary of Doctoral Dissertation
Physical Sciences, Condensed Matter (P260)

Tatjana GRIC

ELEKTROMAGNETINIŲ LAUKŲ IR DISPERSINIŲ
CHARAKTERISTIKŲ SKAIČIAVIMAI ATVIRUOSIUOSE
BANGOLAIDŽIUOSE IŠ SPINDULIUOTĘ SUGERIANČIŲ MEDŽIAGŲ

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, kondensuotos medžiagos (P260)

2011 10 12. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius

