



(10) **LT 6010 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

- (11) Patento numeris: **6010** (51) Int. Cl. (2014.01): **G02F 1/00**
G05F 1/00
- (21) Paraiškos numeris: **2013 079**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2013 07 23**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2014 01 27**
- (45) Patento paskelbimo data: **2014 03 25**
- (62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos numeris: —
- (86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —
- (85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —
- (30) Prioritetas: —
- (72) Išradėjas:
Liudmila NICKELSON, LT
Artūras BUBNELIS, LT
Steponas AŠMONTAS, LT
Juozas RĖKSNYS, LT
Rimantas RĖKSNYS, LT
- (73) Patento savininkas:
Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras,
Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, LT
J. Rėksnio Pj, Goštauto g. 11, LT-02300 Vilnius, LT
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS, Saulėtekio al. 11, LT-10223
Vilnius, LT
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Onutė VALATKEVIČIŪTĖ-DRUŠKAUSKIENĖ, Kalvarijų g. 158-25, LT-08219
Vilnius, LT

- (54) Pavadinimas:
Optiškai valdomas spartus plačiajuostis fazės modulatorius

- (57) Referatas:
Išradimas priskiriamas mikrobangų įtaisams ir yra taikomas bangolaidžiu sklindančios elektromagnetinės (EM) bangos fazei moduluoti. Optiškai valdomas spartus plačiajuostis fazės modulatorius sudarytas iš penkių pagrindinių mazgų. Du cilindriniai metaliniai bangolaidžiai (2), pirmas iš kurių skirtas sužadinti pagrindinę

bangolaidinio tipo bangą, o antras metalinis bangolaidis priima moduluotą signalą ir perduoda jį toliau. Puslaidininkinio bangolaidžio (1), galai yra įstatomi į metalinius bangolaidžius (2), o L ilgio darbinė bangolaidžio (1) dalis patalpinta į solenoidą (3), kuris įtvirtintas ant karkaso (4). Bangolaidis (1) pagamintas iš skylinio laidumo puslaidininkio germanio (p-Ge), kurio EM savybės priklauso nuo koncentracijos proporcijų tarp sunkiųjų ir lengvųjų skylių. Ši proporcija yra valdoma šviesos šaltinių sistema (5) keičiant šviesos intensyvumą bangolaidžio paviršiuje. Puslaidininkiniame p-Ge bangolaidyje sklinda tik pagrindinio tipo hibridinė banga (turinti žemiausią krizinį dažnį) su mažais nuostoliais prie tam tikrų fiksuotų normuoto dažnio reikšmių. Aukštesnio tipo hibridinės bangos šiame bangolaidyje turi labai didelius nuostolius, todėl greitai užgęsta. Keičiant sunkiųjų ir lengvųjų skylių proporciją p-Ge bangolaidyje, keičiasi sklindančios pagrindinės bangos fazė.

Išradimas priskiriamas mikrobanginiams įrenginiams ir yra taikomas bangolaidžių sklindančios bangos fazei moduliuoti.

Analogiškas prietaisas buvo sukurtas [Babbitt R. W., Stern R. A. Dielectric waveguide ferrite modulator/switch, Įgaliojimas (Original Assignee): The United States of America as Represented by the secretary of the army, Patent US4490700 A, Dec 25, 1984].

Analogas yra nuolatinio magnetinio lauko valdomas feritinis modulatorius. Pagrindinės modulatoriaus dalys yra kvadrato formos skerspjūvio feritinis strypas ir solenoidas, kuriantis nuolatinį išilginį magnetinį lauką. Feritinis strypas patalpintas solenoido viduje ir yra priskiriamas dielektrinių bangolaidžių klasei. Tokiame girotropiniame bangolaidyje sklinda pagrindinė ir aukštesnio tipo hibridinės HE_{mn} ir EH_{mn} bangos.

Analogas turi tris esminius trūkumus. Pirmas, tai sąlyginai mažas placiajuostiškumas, kadangi stačiakampio formos skerspjūvio bangolaidyje gali sklisti didesnis parazitinių bangų skaičius, lyginant su tokio pat skerspjūvio ploto cilindrinės formos bangolaidžiu. Antras trūkumas – maža įtaiso greitaveika, kadangi valdančiojo magnetinio lauko H_0 ($B_0 = \mu_0 \mu_r H_0$) pokytis gaunamas keičiant solenoidu tekančios srovės stiprį, todėl valdymo procesas yra inertiškas, nepakankamai spartus. Trečias trūkumas – ribotas darbo dažnių diapazonas, dėl staigaus ferito fazės pokyčio sumažėjimo (proporcingo bangos ilgiui) įmagnetintame feritiniame bangolaidyje aukštų dažnių srityje. Viršutinė dažnių riba, kada keičiant H_0 gali keistis ferito fazės pokytis, yra $2/3$ YAD (ypač aukšti dažniai, 30–300 GHz) diapazono. Šių trūkumų neturi puslaidininkinės medžiagos.

Siekiant išvengti pirmojo minėto trūkumo, siūlomas cilindrinis bangolaidis su normuotu spinduliu $fr = 0,03\text{--}0,1\text{GHz}\cdot\text{m}$. Kai $fr < 0,03\text{GHz}\cdot\text{m}$, modulatoriaus veikimas būtų nestabilus, nes šioje srityje yra pagrindinio bangos tipo krizinis dažnis, be to, fazės pastovioji keičiasi pernelyg sparčiai, kintant dažniui. Kai $fr > 0,1\text{GHz}\cdot\text{m}$ susižadina didelis skaičius aukštesnio tipo parazitinių bangų, kurios yra tos pačios simetrijos kaip ir pagrindinio tipo banga ir jų nuostoliai yra vienos eilės su pagrindinės bangos nuostoliais. Todėl bendri modulatoriaus nuostoliai padidėja, be to, parazitinių bangų nuostoliai papildomai ir neprognozuojamai moduluotų bei iškraipytų naudingą signalą. Atkreipiame dėmesį, kad atitinkamų matmenų stačiakampiame plazminiame

puslaidininkiniame bangolaidyje prie aukštesnių dažnių atsiranda žymiai didesnis skaičius aukštesnio tipo parazitinių bangų, todėl stačiakampė bangolaidžio forma pablogina modulatoriaus charakteristikas.

Siekiant išvengti antrojo minėto trūkumo, siūloma pakeisti feritinę medžiagą, iš kurios pagamintas bangolaidis, puslaidininkine skylinio laidumo germanio (*p*-Ge) medžiaga. Šio puslaidininkio EM savybės priklauso nuo koncentracijos proporcijos tarp sunkiųjų ir lengvųjų skylių. Tokiu būdu, užuot valdant (magnetiniu lauku H_0) bangolaidyje sklindančios bangos ilgį, siūloma fiksuoti pastarąjį dydį, o valdymą atlikti keičiant lengvųjų ir sunkiųjų skylių koncentracijas. Tai pasiekama pereinant skylutėms iš vienos energijos juostos į kitą, veikiant medžiagą infraraudonosios šviesos spinduliais, kurių bangos ilgis *p*-Ge atveju yra $\sim 2\text{--}10\ \mu\text{m}$ (esant laisvųjų krūvininkų koncentracijai $N \sim 10^{19}\text{--}10^{22}\ \text{m}^{-3}$). Toks optinis skylių perėjimas iš vienos valentinės juostos lygmens į kitą yra labai greitas – dešimtųjų pikosekundės dalių eilės ($\sim 10^{-13}\ \text{s}$). Duomenys apie šio proceso greitaveiką paimti iš literatūros [Beregulin E.V. et al. Mechanisms of energy relaxation under conditions of nonlinear absorption of light in *p*-type Ge, Sov. phys. Semicond., 16 (2), 1982, p. 179–181]. [Leung C.Y. Enhanced direct-free-hole absorption in picosecond laser-excited Germanium, Kinese Journal of Physics, Vol. 18, N4, 1980, p. 158–171].

Siekiant išvengti trečiojo minėto trūkumo, siūloma įmagnetintą feritą pakeisti kieto kūno puslaidininkine plazma. Plazminis puslaidininkinis bangolaidis gali veikti visame YAD diapazone, o taip pat ir aukštesnių dažnių, pavyzdžiui, HAD (hiperaukštieji dažniai, 300–3000 GHz) diapazone. Kiekvienam dažnių diapazonui yra apskaičiuojamas bangolaidžio spindulys. Norint gauti norimas bangolaidžio EM charakteristikas, t. y. nustatyti reikiamas medžiagos savybes tam tikrame dažnių ruože, reikia atitinkamai pakeisti puslaidininkio laisvųjų krūvininkų koncentraciją N ir (arba) dydį H_0 .

Mūsų siūlomo optiškai valdomo spartaus plačiajuosčio fazės modulatoriaus, sudaryto iš atviro puslaidininkinio plazminio bangolaidžio ir apšvietimo sistemos, naujumas yra tas, kad cilindrinės formos bangolaidis pagamintas iš skylinio laidumo germanio (*p*-Ge), kurio EM savybės stipriai priklauso nuo koncentracijos proporcijos tarp sunkiųjų ir lengvųjų skylių, o ši proporcija yra valdoma keičiant šviesos intensyvumą šviesos šaltinių sistemos pagalba.

Išradimo esmė paaiškinta brėžiniuose, kuriuose parodyti:

1 pav. Optiškai valdomo spartaus plačiajuosčio fazės modulatoriaus konstrukcija.

2 pav. Pagrindinio ir aukštesniųjų bangos tipų normuoto fazės koeficiento $h'r$ priklausomybė nuo normuoto dažnio fr plazminiame p -Ge bangolaidyje, kurio $\epsilon_k = 16$, $B_0 = 1 \text{ T}$, $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $m_h^* = 0,279m_e$, $m_l^* = 0,043m_e$, $\mu_h^* = 6,3 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\mu_l^* = 40,9 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, kai sunkiųjų skylių koncentracija puslaidininkyje sudaro 70 %.

3 pav. Pagrindinio ir aukštesniųjų bangos tipų normuoto slopinimo koeficiento $h''r$ priklausomybė nuo normuoto dažnio fr plazminiame p -Ge bangolaidyje, kurio $\epsilon_k = 16$, $B_0 = 1 \text{ T}$, $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $m_h^* = 0,279m_e$, $m_l^* = 0,043m_e$, $\mu_h^* = 6,3 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\mu_l^* = 40,9 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, kai sunkiųjų skylių koncentracija puslaidininkyje sudaro 70 %.

4 pav. Pagrindinio bangos tipo fazinės charakteristikos $h'r(fr)$ priklausomybė nuo santykinės sunkiųjų skylių koncentracijos. Punktyrinėmis linijomis pavaizduotos kreivės atitinka sunkiųjų skylių koncentracijas 50 %, 55 %, 90 % ir 95 %, ištisinėmis linijomis pavaizduotos kreivės atitinka sunkiųjų skylių koncentracijas 60–90 %.

Modulatorius sudarytas iš elementų: puslaidininkinis p -Ge bangolaidis (1); cilindriniai metaliniai bangolaidžiai (2); solenoidas (3); dielektrinis karkasas (4); šviesos šaltinių sistema (5); laikikliai (6).

Modulatorius veikia tokiu būdu. Plazminis puslaidininkinis cilindrinis bangolaidis yra pagamintas iš laidumo germanio (p -Ge), kurio dielektrinės skvarbos tenzoriaus elementai ϵ_{xx} , ϵ_{xy} , ϵ_{zz} , t. y. EM puslaidininkio savybės skirtingomis kryptimis, stipriai priklauso nuo koncentracijos proporcijos tarp sunkiųjų ir lengvųjų skylių, o ši proporcija yra valdoma šviesos šaltinių sistemos. Keičiant šviesos, apšviečiančios bangolaidžio darbinį paviršių, intensyvumą, yra keičiama bangolaidyje sklindančios EM bangos fazė. Svarbu, kad cilindrinio plazminio p -Ge bangolaidžio normuotas spindulys yra diapazone $fr = 0,03\text{--}0,1 \text{ GHz}\cdot\text{m}$, sunkiųjų skylių koncentracija yra keičiama nuo 60 % iki 90 % bendros skylių koncentracijos N bangolaidyje. Modulatorius skirtas darbui ir prie žemos temperatūros, todėl gali būti naudojamas palydovinėje įrangoje, dirbančioje virš Žemės stratosferos (Kosmose).

Siūlomo įtaiso aktualumą ir poreikį patvirtina pastarųjų metų patentai:

1. [Eu-Jin Andy Lim et al. Optical Modulator and Method for Manufacturing the Same, Assignee: Agency For Science, Technology and Research, Patent

US20130071058 A1, Mar 21, 2013]. Naudojama sudėtinga daugiasluoksnė struktūra, sudaryta iš sluoksniuoto germanio (Ge) ir silicio (Si) bangolaidžio, sudėtingos metalinių kontaktų konfigūracijos ir oksido sluoksnio. Germanio bangolaidis taip pat suformuotas iš kelių sluoksnių. Struktūroje yra du bangolaidžiai, ryšys tarp kurių sudarytas per germanio bangolaidį. Konstrukcijos trūkumai – sudėtinga gamyba, inertiškumas.

2. [Hideki Yagi; Method for manufacturing semiconductor optical modulator and semiconductor optical modulator, Assignee: Sumitomo Electric Industries, Ltd. (Osaka), Patent US20120308173 A1, Dec 06, 2012]. Naudojama sudėtinga daugiasluoksnė dvilaidė mikrojuostelinė (MJL) struktūra, sudaryta iš *p*-tipo ir *n*-tipo puslaidininkinių sluoksnių padėklo, įžemintas sluoksnis gali būti pagamintas iš nelegiruoto puslaidininkio InP. Juostelių, pagamintų iš silicio nitrido (SiN) arba silicio oksido (SiO₂), storis yra 300 nm. Trūkumas – konstrukcijos sudėtingumas.

3. [Toshio Baba et al. Optical modulator and method for manufacturing same, Assignee: Nec Corporation, Patent US20120003767 A1, Jan 5, 2012]. Konstrukcijoje panaudotas atviras daugiasluoksnis briaunuotas bangolaidis, sudarytas iš puslaidininkinių ir dielektrinių sluoksnių. Trūkumai – konstrukcijos sudėtingumas ir inertiškumas.

4. [Je Ha Kim et al. High speed semiconductor optical modulator and fabricating method thereof, Assignee: Electronics and Telecommunication Research Institute, Patent US6392781 B1, May 21, 2002]. Naudojama sudėtinga daugiasluoksnė vienlaidė MJL struktūra, turinti įvairių dydžių bangolaidinius kanalus.

Plazminio *p*-Ge bangolaidžio dispersinės charakteristikos buvo išnagrinėtos kai sunkiųjų skylių koncentracija puslaidininkyje sudaro nuo 0 iki 100 % visų krūvininkų koncentracijos N , su žingsniu 5 %. Čia mes pristatėme *p*-Ge bangolaidžio dispersines charakteristikas (2, 3 pav.), kai sunkiųjų skylių koncentracija yra 70 %. Pristatytos pagrindinės (turinčios žemiausią krizinį dažnį) bangos HE₁₁ ir trijų aukštesnio tipo parazitinių hibridinių bangų dispersinės kreivės. Fazinė bangolaidžio charakteristika yra tiesinė plačiame dažnių ruože (4 pav.). Bangolaidžio normuotas dažnis $fr = 0,03\text{--}0,1 \text{ GHz}\cdot\text{m}$, pastoviojo magnetinio srauto tankis (magnetinė indukcija) $B_0 = 1 \text{ T}$, bendra skylių koncentracija $N = 5\cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, sunkiųjų skylių efektinė masė $m_h^* = 0,279m_e$, lengvųjų skylių efektinė masė $m_l^* = 0,043m_e$, kur m_e yra elektrono masė, sunkiųjų skylių judris $\mu_h^* = 6,3 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, lengvųjų skylių judris

$$\mu_1^* = 40,9 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}.$$

Fazės poslinkis skaičiuojamas pagal (1) formulę:

$$|\Delta\vartheta|_{fr = \text{const}} = |h'_{90\%} - h'_{60\%}|_{fr = \text{const}} \times \frac{360L}{2\pi}, ^\circ (\text{laip.}), \quad (1)$$

čia $h'_{60\%}$ ir $h'_{90\%}$ – pagrindinio bangos tipo išilginė sklaidimo pastovioji, kai sunkiųjų skylių koncentracija sudaro atitinkamai 60 % ir 90 % visų krūvininkų koncentracijos bangolaidyje; L – bangolaidžio ilgis.

Kai $fr = 0,09 \text{ GHz}\cdot\text{m}$, $h'_{60\%} = 7287 \text{ m}^{-1}$, $h'_{90\%} = 7328 \text{ m}^{-1}$, $L = 10 \text{ cm}$, fazės poslinkis $|\Delta\vartheta| \approx 235^\circ$.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

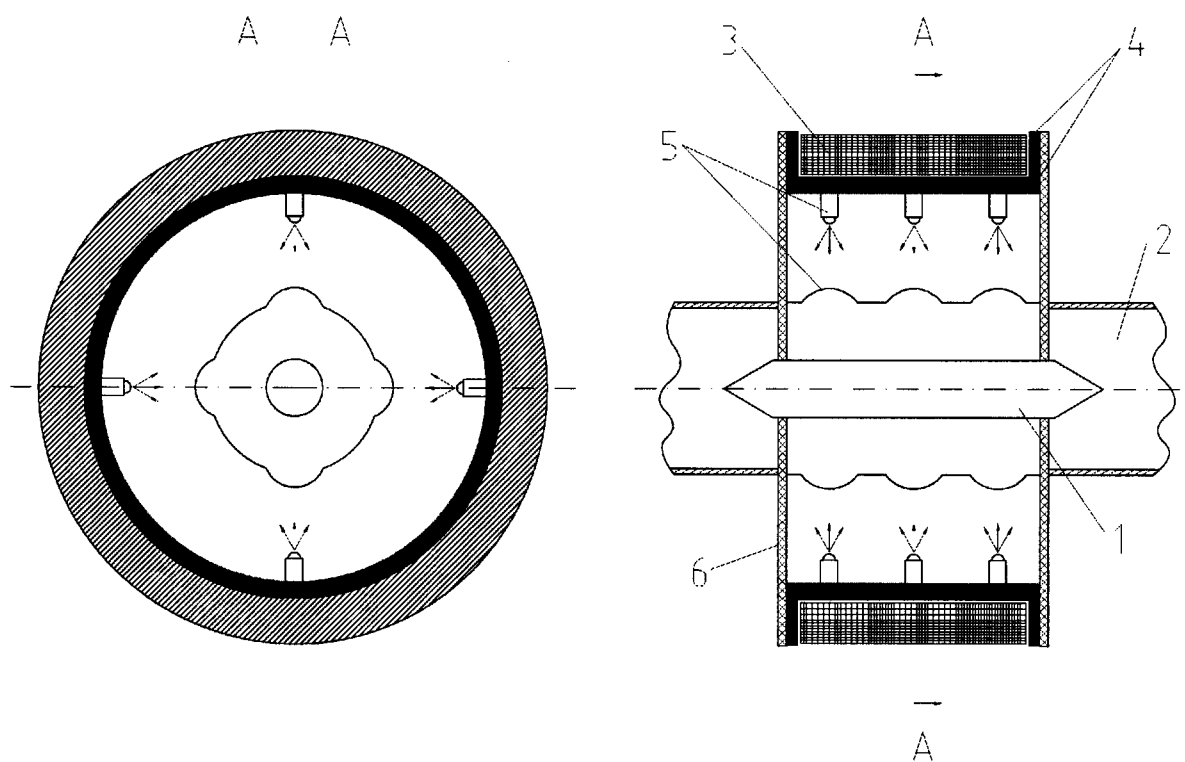
1. Optiškai valdomas spartus plačiajuostis fazės modulatorius, sudarytas iš atvirojo bangolaidžio su kūgiškai suformuotais galais (1), įstatytais į metalinius cilindrinis bangolaidžius (2), solenoido (3), kuriančio išilginį nuolatinį magnetinį lauką H_0 , ir dielektrinio karkaso (4), besiskiriantis tuo, kad plazminis (giroelektrinis) puslaidininkinis bangolaidis (1) turi cilindrinę formą ir pagamintas iš skylinio laidumo germanio (p -Ge), kurio elektromagnetinės (EM) savybės labai priklauso nuo koncentracijos proporcijos tarp sunkiųjų ir lengvųjų skylių, ši proporcija yra valdoma šviesos šaltinių sistema (5) keičiant šviesos intensyvumą.

2. Modulatorius pagal 1 punktą, besiskiriantis tuo, kad cilindrinio plazminio puslaidininkinio bangolaidžio normuotas spindulys yra diapazone $fr = 0,03\text{--}0,1\text{ GHz}\cdot\text{m}$.

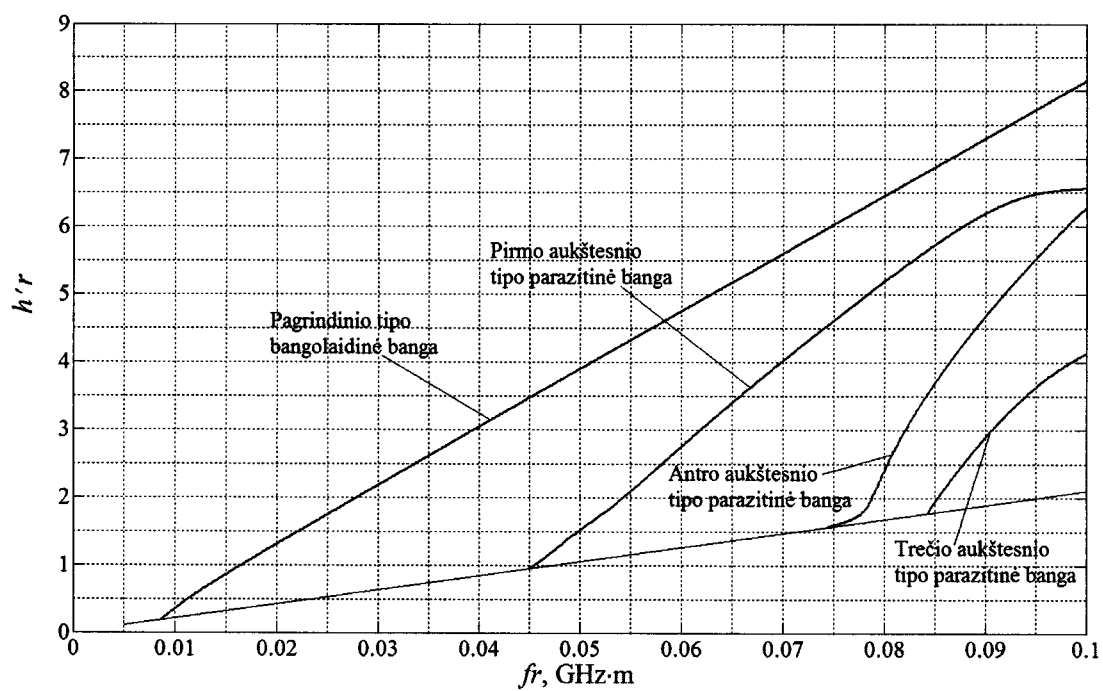
3. Modulatorius pagal 1 ir 2 punktus, besiskiriantis tuo, kad sunkiųjų skylių koncentracija keičiama nuo 60 % iki 90 % bendros skylių koncentracijos N bangolaidyje.

4. Modulatorius pagal 1–3 punktus, besiskiriantis tuo, kad išorinis dielektrinis karkasas (4), kuris sudarytas iš solenoido laikiklio ir atšvaito, yra tuščiaviduris cilindras, pagamintas iš išorinio nemagnetinio dielektrinio sluoksnio, kurio išoriniame paviršiuje įtvirtintas nuolatinis išilginis magnetinis lauką kuriantis solenoidas (3), o vidinis karkaso paviršius yra nemagnetinis dielektrinis sluoksnis, pagamintas iš medžiagos su aukšta santykinė dielektrine skvarba, atliekantis atšvaito (reflektoriaus) funkciją, o dielektrinis karkasas (4) ir šviesos šaltinių sistema (5) tvirtinami laikikliais (6) prie bangolaidžio.

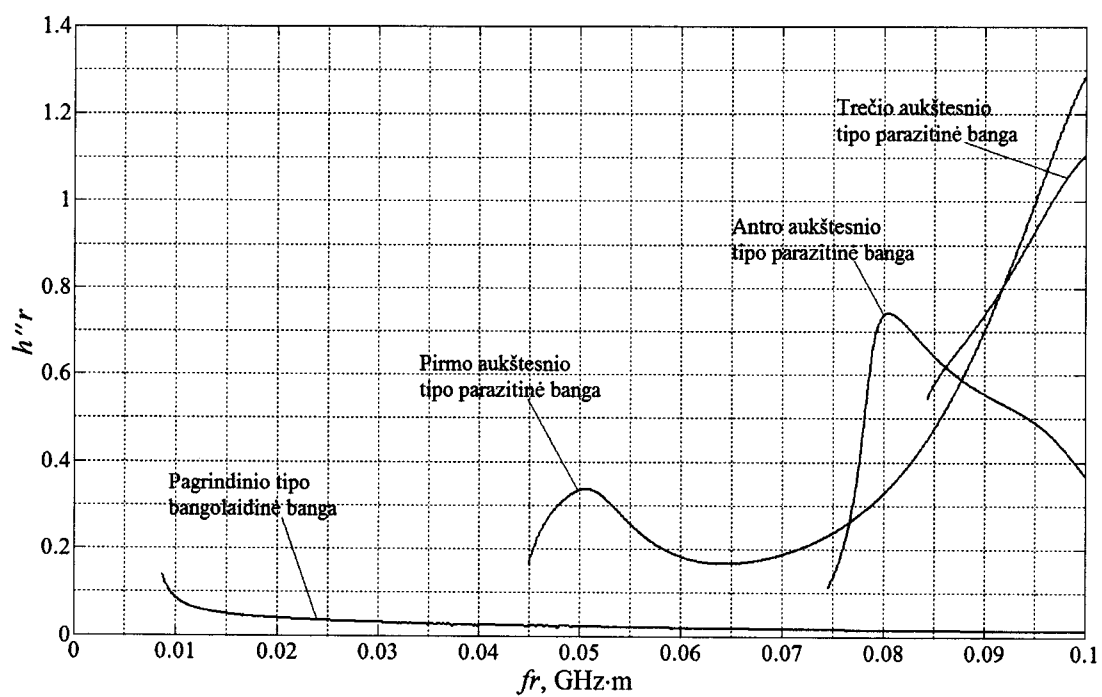
5. Modulatorius pagal 1–4 punktus, besiskiriantis tuo, kad šviesos šaltinių sistema (5) yra sudaryta iš pakankamo kiekio ir konfigūracijos šviesos šaltinių, kurių šviesos spinduliai koncentruojami lėšiais ir krisdami ant p -Ge bangolaidžio (1) paviršiaus, būtų vienodos poliarizacijos ir intensyvumo išilgai viso darbinio ilgio L paviršiaus, o šviesos intensyvumą reguliuojanti sistema yra valdoma nuolatine įtampa, kuri priklauso nuo moduliuojančio signalo.



1 pav.

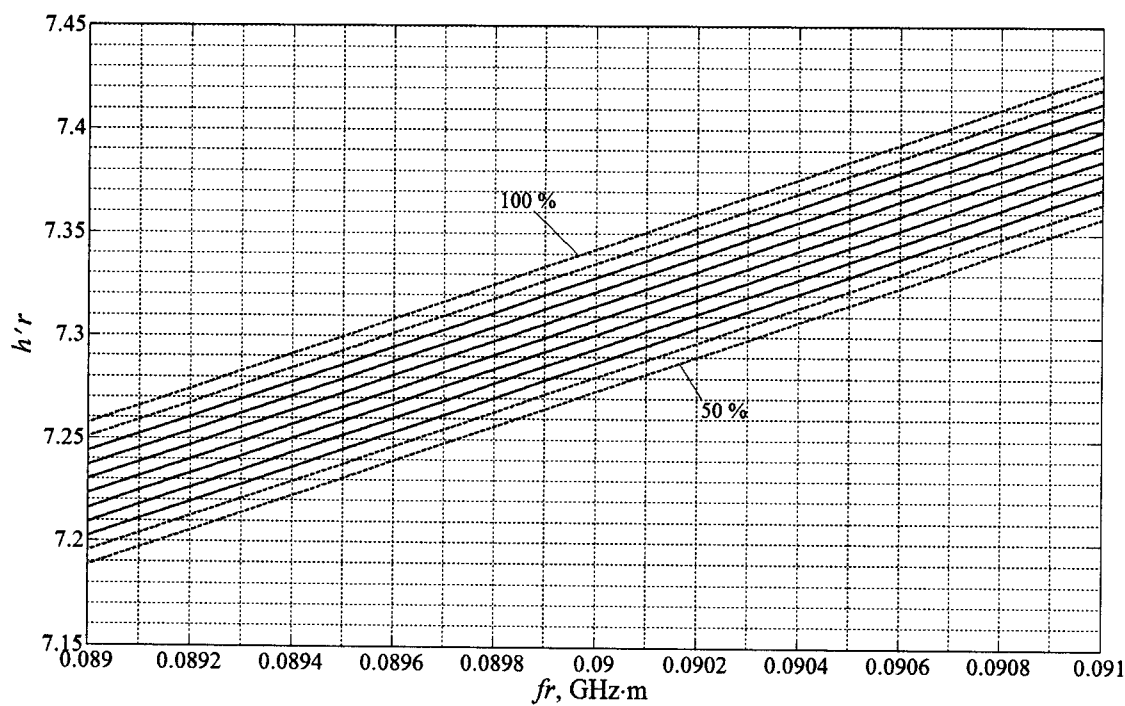
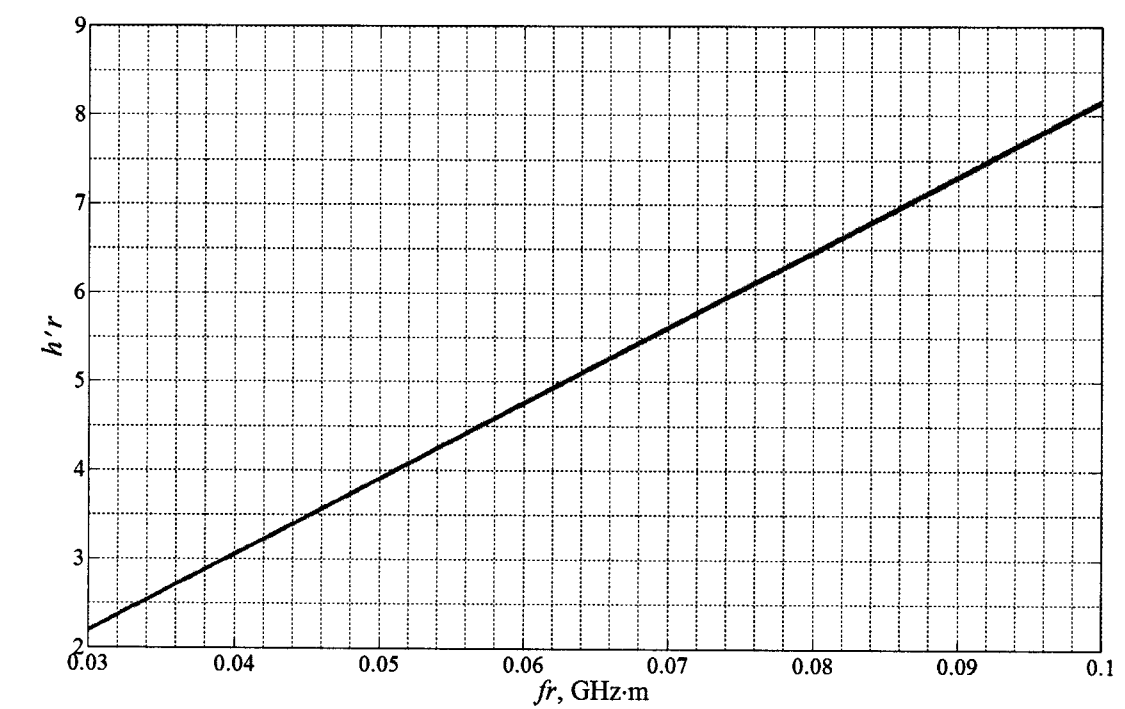


2 pav.



3 pav.

LT 6010 B



4 pav.