

## Atvirųjų plyšinių linijų su puslaidininkiniais padėklais tyrimas

L. Nickelson, M. Tamošiūnienė, S. Ašmontas,

*Puslaidininkų fizikos institutas, A. Goštauto g. 11, LT-01108 Vilnius, Lietuva, tel.: +370 2 619759, +370 2 792951; faks. +370 2 627123, el. paštas: lucy\_nickelson@cablenet.lt; milda@pfi.lt; asmontas@pfi.lt*

S. Tamošiūnas

*Vilniaus universiteto Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas, Saulėtekio al. 9, III, LT-10222 Vilnius, Lietuva, el. paštas: stasys.tamosiunas@ff.vu.lt*

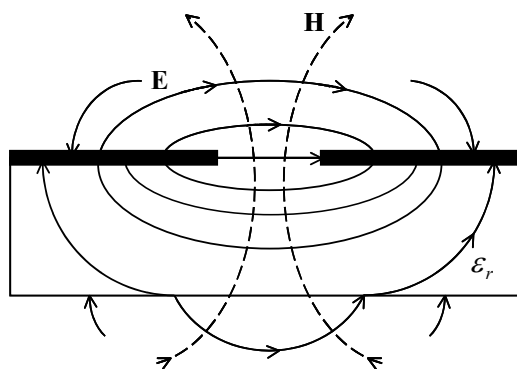
### Ivadas

Plyšinės linijos plačiai naudojamos integruojuose grandynuose. Lygiagrečiai su tokia linija patogiu ir paprastu prijungti išorinius sutelktuosius elementus (pvz., puslaidininkinius diodus, rezistorius ir kondensatorius), nes plyšio plokštumoje elektrinio lauko jėgų linijos yra nukreiptos skersai plyšio (1 pav.).

Plyšinės linijos gali būti naudojamos ir atskirai, bet jas derinant su mikrojuostelinėmis linijomis atsiveria plačios perspektyvos kurti išsišakojusius daugiaelementus SAD mikrograndynus. Plyšinę liniją naudojant elektromagnetinei energijai perduoti, nuostoliai dėl išspinduliavimo turi būti kuo mažesni, todėl ypač svarbu, kad metalo juostelių paviršiai būtų kuo lygesni. Jei plyšinės linijos padėklas yra pagamintas iš medžiagos, kurios dielektrinė skvarba yra didelė, labai sumažėja bangos ilgis plyšyje, palyginti su bangos ilgiu laisvojoje erdvėje, o lauko jėgų linijos būna sukonzentruotos arti plyšio. Tuo atveju nuostoliai dėl išspinduliavimo esti nedideli.

Banga, sklindanti plyšine linija, nėra TEM (skersinė elektromagnetinė) banga, nes išilginiai lauko sandai nelygūs nuliui. Tuo plyšinės linijos skiriasi nuo mikrojuostelinių linijų su plonais (palyginti su bangos ilgiu) padėklais, kurioms tirti galima naudoti TEM artinį. Skaičiuodami plyšinių linijų elektrodinaminius būdinguosius dydžius, uždavinį turime spręsti elektrodinamiškai griežtai.

Plyšines linijas galima naudoti kartu su mikrojuostelinėmis linijomis kuriant mažų matmenų SAD įrenginius bei integruojant grandynus. Yra įdomi galimybė, gaminant SAD įrenginius, vienoje padėklo pusėje naudoti plyšinę liniją, o kitoje – mikrojuostelinę. Kol jas skiriantis atstumas bus nedidelis, tarp jų egzistuos ryšys. Plyšinę ir mikrojuostelinę linijas gerokai nutolinus vieną nuo kitos, jos bus nepriklausomos. Lygiagrečios plyšinės ir mikrojuostelinės linijos gali sudaryti kryptinį atšakotuvą. Pushanginis plyšys gali būti rezonatorius. Plyšinę liniją galima naudoti užtvariniuose ir juostiniuose filtruose. Užtvarinio filtro įėjimas ir išėjimas gali būti mikrojuosteliniai, o juostinio – plyšiniai.



1 pav. Lauko pasiskirstymas plyšinėje linijoje

Magnetinio lauko jėgų linijos plokštumoje, statmenoje padėklo paviršiui, energijos sklaidimo kryptimi sudaro uždaras kilpas intervalu, lygiu pusei bangos ilgio. Tai reiškia, kad plyšinėje linijoje yra magnetinio lauko elipsinės poliarizacijos sritys, ir tai gali būti panaudojama kuriant neapipusius feritinius įrenginius: rezonansinius ventilius ir diferencialinius fazės keitiklius.

[1] darbe pateiktos pagrindinės ir aukštesniųjų modų, galinčių sklirti plyšine linija, dispersinės priklausomybės. Šio darbo autoriai plyšines linijas tyrė momentų metodu. Darbe pateiktos lyginės ir nelyginės simetrijos modų dispersinės priklausomybės ir elektrinio lauko pasiskirstymas plyšinės linijos skerspjūvyje.

[2]–[4] straipsniuose aprašomas ekranuotųjų plyšinių linijų su be galo plačiais padėklais tyrimas. Tačiau kai plyšine linija sklindančios bangos ilgis ir padėklo plotis yra tos pačios eilės, toks artinys nėra tinkamas. Būtina tenkinti kraštines sąlygas padėklo šoninėse briaunose [5].

[6] ir [7] darbuose tiriant plyšines linijas daroma prielaida, kad juostiniai laidininkai yra be galo ploni ir be galo platūs.

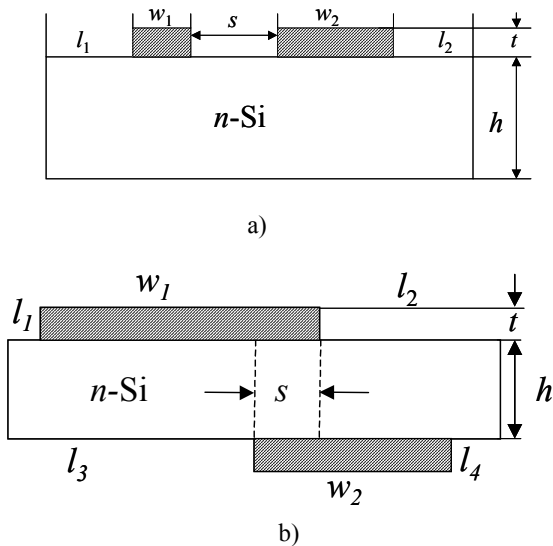
[8] darbe yra apžvelgtas plyšinių linijų ir komplanarinių bangolaidžių, naudojamų integruojuose superaukštųjų dažnių grandynuose, tyrimas, aprašyti artiniai, naudojami sprendžiant šį uždavinį. Taikant aprašytą [8] antros eilės artinį, gaunama maždaug 10 procentų paklaida.

Mūsų sukurtas algoritmas tinka, kai atvirųjų plyšinių linijų padėklo plotis ir juostinių laidininkų storiai bei pločiai yra baigtiniai.

Nustatėme [9], [10], jog, priešingai nusistovėjusiai nuomonei, kad kai plyšio plotis yra mažesnis už tam tikrą plotį, kuriam esant linija sklinda tik pagrindinė moda, ir toliau siaurinant plyšį linija sklis tik viena moda, modų skaičius gali didėti tiek siaurinant plyšį, tiek jį platinant. Jei plyšį labai susiauriname, elektromagnetinė banga „nebejaučia“ plyšio ir plyšinės linijos charakteristikos tampa panašios į dielektrinio bangolaidžio su vienu juostiniu laidininku charakteristikas, o šiais bangolaidžiais sklinda ne tik pagrindinė, bet ir kelios aukštesniosios modos. Tai rodo teorinių skaičiavimų konkrečiai plyšinei linijai svarbą.

Šiame darbe elektrodinamiškai griežtai (sprendinys tenkina Maksvelo lygtis, visas kraštines sąlygas, sąlygą briaunoje ir begalybėje) sprendžiame Maksvelo lygtis plyšinėms linijoms su puslaidininkiniais  $n$ -Si (elektroninio silicio) padėklais, kai juostiniai laidininkai ant padėklo yra išdėstyti simetriškai ir asimetriškai. Mūsų darbo tikslas buvo iširti, kokią įtaką linija sklindančių modų skaičiui bei jų spektrui turi padėklo plotis bei storis, plyšio plotis, juostinių laidininkų plotis bei jų išdėstymas padėklo paviršiuose: tame pačiame padėklo paviršiuje (2 pav. a) ir priešinguose padėklo paviršiuose (2 pav. b).

Atvirąsias planarines ir neplanarines plyšines linijas tyrėme metodu, besiremiančiu singularinių integralinių lygčių teorija [5]. Norėdami pabrėžti šio metodo universalumą, šiame darbe aprašome skirtingos skerspjuvio formos plyšinių linijų skaitinio tyrimo rezultatus.



**2 pav.** Plyšinių linijų skerspjuvio vaizdas: a – planarinė plyšinė linija, kurios juostiniai laidininkai yra viršutiniame padėklo paviršiuje, b – neplanarinė plyšinė linija, kurios juostiniai laidininkai yra priešinguose padėklo paviršiuose

### Atvirųjų plyšinių linijų tyrimo rezultatai

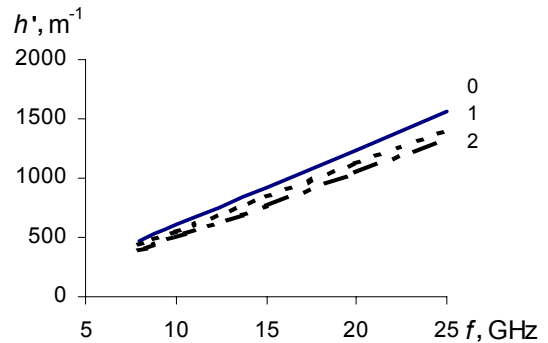
Skaičiavimo algoritmo ir programų teisingumą mes patikrinome palygindami šiame darbe pateiktus rezultatus

su [6] darbe pateiktais rezultatais. Skirtumas yra mažesnis kaip 2 %.

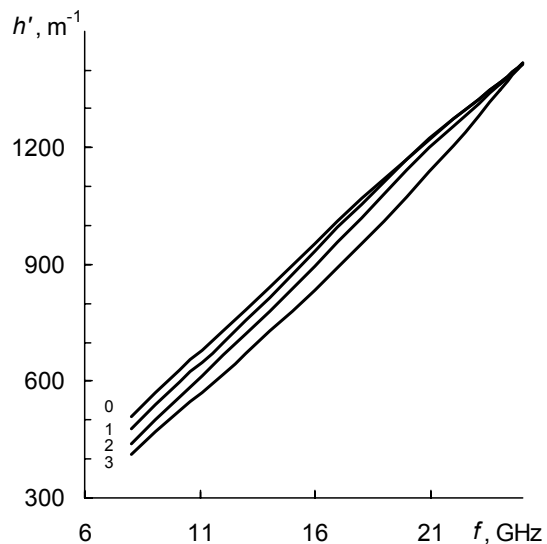
3 – 8 paveiksluose pateiktos kreivės gautos, kai  $n$ -Si padėklo santykinė dielektrinė skvarba buvo  $\epsilon_r = 11,8$ . Nuostolių padėklo medžiagoje neįskaitėme. Visi plyšinės linijos matmenys buvo normuoti į padėklo storį  $h$ .

Pagrindinė moda, sklindanti plyšine linija, pažymėta „0“, o aukštesniosios – „1“, „2“ ir t. t.

3 ir 4 pav. pateikti planarinių atvirųjų plyšinių linijų, kurių juostiniai laidininkai yra išdėstyti tame pačiame padėklo paviršiuje bei vienodu atstumu  $l_1 = l_2$  yra nutolę nuo padėklo kraštų, skaičiavimo rezultatai. Be to, plyšinių linijų juostiniai laidininkai yra vienodo pločio ( $w_1 = w_2 = 2h$ ), juostinių laidininkų storis  $t = 0.003 \cdot h$ , plyšio plotis  $s$  yra vienodas ( $s = h$ ), kur  $h = 1 \cdot 10^{-3}$  m.



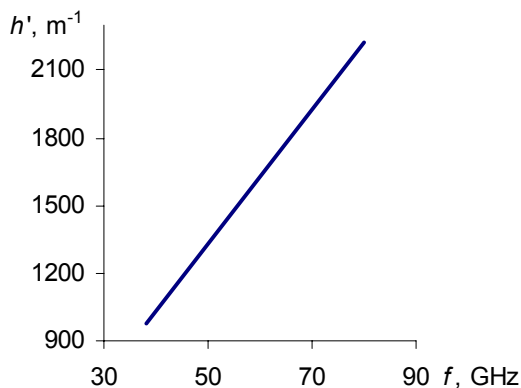
**3 pav.** Planarinės plyšinės linijos sklidimo konstantos priklausomybės nuo signalo dažnio, kai juostiniai laidininkai yra padėklo kraštuose ( $l_1 = l_2 = 0$ )



**4 pav.** Planarinės plyšinės linijos sklidimo konstantos priklausomybės nuo signalo dažnio, kai vienodo pločio juostiniai laidininkai yra nutolę nuo padėklo kraštų ( $l_1 = l_2 = 2h$ )

3 pav. pateiktos sklidimo konstantos priklausomybės apskaičiuotos, kai juostiniai laidininkai yra prie padėklo kraštų ( $l_1 = l_2 = 0$ ). 4 pav. kreivės gautos, kai abu juostiniai laidininkai yra nutolę nuo padėklo kraštų atstumu  $l_1 = l_2 = 2h$ . 3 pav. pateiktos kreivės rodo, kad kai padėklas

yra siauresnis, o juostiniai laidininkai išsidėstę padėklo kraštuose, plyšinė linija sklinda pagrindinė ir dvi aukštesniosios modos. Paplatinus padėklą (4 pav.), kartu atitolinant jo kraštus nuo juostinių laidininkų, plyšinė linija sklindančių modų skaičius padidėja: plyšinė linija sklinda keturios modos (pagrindinė ir trys aukštesniosios modos). Be to, jų spektras yra tankesnis. Pirmoji aukštesnioji moda priartėja prie pagrindinės. Tokia padėklo pločio vertės įtaka gautiems rezultatams rodo, kaip svarbu skaičiuojant įskaityti baigtinį padėklo plotį. Kai  $f > 18$  GHz, pagrindinė ir pirmoji aukštesnioji moda beveik sutampa. Toliau didinant signalo dažnį  $f$ , pagrindinė ir aukštesniosios modos priartėja viena prie kitos ir, kai  $f = 25$  GHz, jos beveik sutampa – gavome aukštadažnę atkirtą.



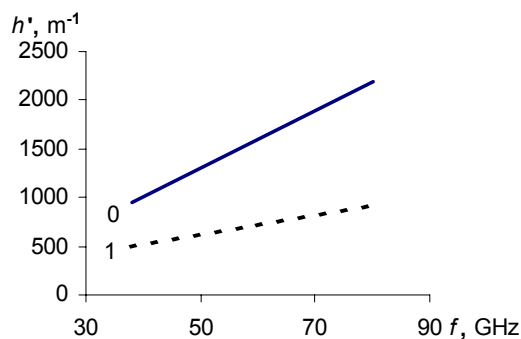
**5 pav.** Neplanarinės plyšinės linijos, kurios juostiniai laidininkai yra išdėstyti priešinguose padėklo paviršiuose, sklidimo konstantos priklausomybės nuo signalo dažnio, kai padėklo storis yra lygus  $h = 5 \cdot 10^{-6}$  m,  $l_1 = l_4 = 200$  h,  $l_2 = l_3 = 236$  h,  $s = -20$  h,  $w_1 = w_2 = 40$  h

5 – 8 paveiksluose pateiktos sklidimo konstantos priklausomybės nuo dažnio, kai neplanarinių atvirųjų plyšinių linijų juostiniai laidininkai yra išdėstyti priešinguose padėklo paviršiuose. Juostinių laidininkų storis  $t = 0,6$  h.

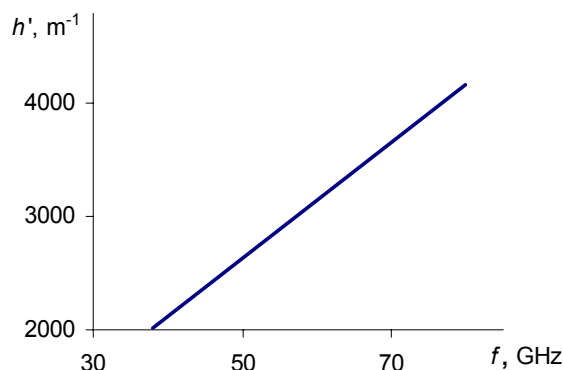
5 ir 7 pav. bei 6 ir 8 pav. pateiktos priklausomybės, apskaičiuotos plyšinėms linijoms, kurios skiriasi tuo, kad juostinių laidininkų pločiai yra skirtingi, nors suminiai abiejų juostinių laidininkų pločiai abiem atvejais yra vienodi. Be to, skiriasi juostinių laidininkų atstumai iki padėklo kraštų. Skiriasi ir plyšio plotis. 7 ir 8 pav. kreivės apskaičiuotos, kai plyšys yra penkis kartus siauresnis, nes, pakeitus juostinių laidininkų pločius, jie mažiau dengia vienas kitą. 5 ir 7 pav. pateikti rezultatai gauti, kai padėklo storis yra  $h$ , o 6 ir 8 pav. – kai padėklas buvo tris kartus storesnis. Jo storis šiuo atveju lygus  $3h$ . Palyginę 7 ir 8 paveiksluose pateiktus skaičiavimo rezultatus, matome, kad, nors padėklą pastorinome 3 kartus, plyšinė linija sklinda tik pagrindinė moda, o 6 pav. pateiktu atveju, pastorinus padėklą 3 kartus, be pagrindinės modos, dar atsirado ir pirmoji aukštesnioji moda.

Šių rezultatų palyginimas akivaizdžiai parodo, kokią įtaką plyšinė linija sklindančių modų skaičiui turi kraštinių sąlygų pasikeitimas. Tai dar kartą įrodo, kad, norint gauti plyšinę liniją, kuria sklįstų tik viena moda, būtini išankstiniai skaičiavimai. Jei, keičiant kraštines sąlygas, nepavyktų pasiekti, kad plyšinė linija sklįstų tik pagrindinė

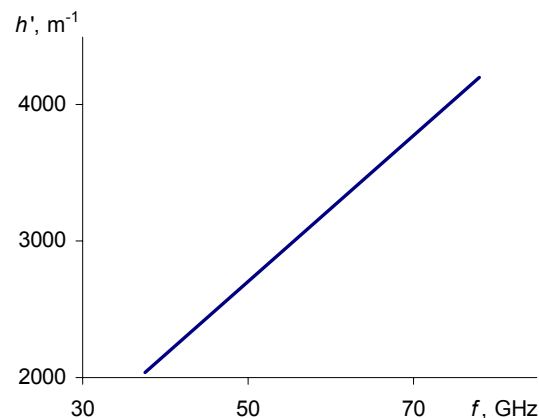
moda, galima bent jau išretinti modų spektrą, t. y. atitolinti aukštesniasias modas nuo pagrindinės modos.



**6 pav.** Neplanarinės plyšinės linijos, kurios juostiniai laidininkai yra išdėstyti priešinguose padėklo paviršiuose, sklidimo konstantos priklausomybės nuo signalo dažnio, kai padėklo storis yra lygus  $3h = 15 \cdot 10^{-6}$  m,  $l_1 = 200$  h,  $l_2 = 236$  h,  $l_3 = 236$  h,  $l_4 = 200$  h,  $s = -20$  h,  $w_1 = 40$  h,  $w_2 = 40$  h



**7 pav.** Neplanarinės plyšinės linijos, kurios juostiniai laidininkai yra išdėstyti priešinguose padėklo paviršiuose, sklidimo konstantos priklausomybės nuo signalo dažnio, kai padėklo storis yra lygus  $h = 5 \cdot 10^{-6}$  m,  $l_1 = l_4 = 200$  h,  $l_2 = 256$  h,  $l_3 = 216$  h,  $s = -4$  h,  $w_1 = 20$  h,  $w_2 = 60$  h



**8 pav.** Neplanarinės plyšinės linijos, kurios juostiniai laidininkai yra išdėstyti priešinguose padėklo paviršiuose, sklidimo konstantos priklausomybės nuo signalo dažnio, kai padėklo storis yra lygus  $3h = 15 \cdot 10^{-6}$  m,  $l_1 = l_4 = 200$  h,  $l_2 = 256$  h,  $l_3 = 216$  h,  $s = -4$  h,  $w_1 = 20$  h,  $w_2 = 60$  h

7 ir 8 paveikluose pateiktos sklaidimo konstantos priklausomybės nuo signalo dažnio rodo, kad tris kartus pastorinus padėklą sklaidimo konstantos vertės beveik nepakinta, nes padėklo storio pokytis yra nedidelis palyginti su bangos, sklindančios linija, ilgiu.

## Išvada

Modų, sklindančių ištirtosiomis plyšinėmis linijomis, skaičių galima keisti keičiant plyšinės linijos padėklo, plyšio ir juostinių laidininkų pločius bei juostinių laidininkų išdėstymą padėklo paviršiuose.

## Literatūra

1. Even and odd modes on a conductor – backed slotline/ **J. Zehentner, J. Machac, J. Mrkvica** //32<sup>nd</sup> European Microwave Conference 2002, 25<sup>th</sup>. September 2002, fiera di Milano, Milan, Italy. Conference Proceedings. – Vol. 2. (Microwave Engineering Europe, CMP Europe Ltd, 2002).
2. **Cano G., Medina F., and Horno M.** On the efficient implementation of SDA for boxed strip – like and slot – like structures // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.–1998.–Vol. 46, No. 11.–P.1801–1806.
3. **Tsalamengas J. L.** Exponentially converging direct singular integral – equation methods in the analysis of microslot lines on layered substrates // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.–1999.–Vol. 47, No. 10.–P.2031–2034.

4. **Du Z., Gong K., Fu J. S., Feng Z., Gao B.** Authors'Reply – Some Problems About Asymmetrical Coplanar Strip Lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.–2001.–Vol. 49, No. 2.–P.410–411.
5. **Nickelson L., Shugurov V.** Methods of Singular Integral Equations for Computation of Electrodynamical Problems // Vilnius: Mokslo aidai, 2003. – 255 p.
6. **Федоров А. Н., Левина Н. Н., Хаметова Н. А.** Некоторые результаты численного исследования щелевой и полосоно щелевой линии // Радиотехника и электроника.– 1984.– Т. 28, No. 7.– С. 1282–1292.
7. **Svačina J.** Dispersion Characteristics of Multilayered Slotlines – A Simple Approach // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.–1999.–Vol. 47, No. 9.– P.1826–1829.
8. **Воробьев В. В.** Щелевые линии передачи и компланарные волноводы для интегральных СВЧ схем // Зарубежная радиоэлектроника.–1972.– No. 5. – P.93–116.
9. **Nickelson L., Asmontas S., Tamosiuniene M., Shugurov V.** Numerical study of open slot lines with asymmetrically placed strip conductor in 37.5-78 GHz frequency band // International Journal of Infrared and Millimeter Waves- 2003. – Vol. 24, No. 11. – P.1913–1923.
10. **Nickelson L., Tamošiūnienė M., Ašmontas S., Tamošiūnas V.** Juostinių linijų su puslaidininkiniais padėklais skaitinis tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika.– Kaunas: Technologija, 2004. – Nr.1 (50). – P.16–21.

Pateikta spaudai 2004 06 01

**L. Nickelson, M. Tamošiūnienė, S. Ašmontas, S. Tamošiūnas. Atvirųjų plyšinių linijų su puslaidininkiniais padėklais tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika.–Kaunas: Technologija, 2004.–Nr. 7(56).– P. 25–28.**

Šiame darbe singularinių integralinių lygčių metodu elektrodinamiškai griežtai (sprendinys tenkina Maksvelo lygtis, visas kraštines sąlygas, sąlygą briaunoje ir begalybėje) ištirtos atvirosios planarinės ir neplanarinės plyšinės linijos su *n*-Si padėklais, kai juostiniai laidininkai buvo išdėstyti tame pačiame padėklo paviršiuje ir kai jie buvo išdėstyti priešinguose padėklo paviršiuose. Algoritmas tinka, kai atvirųjų plyšinių linijų padėklo plotis ir juostinių laidininkų storai bei pločiai yra baigtiniai.

Apskaičiuotos pagrindinės ir aukštesniųjų modų sklaidimo linijomis konstantų priklausomybės nuo dažnio, kai skyrėsi plyšio plotis, juostinių laidininkų plotis, jų išdėstymas padėklo paviršiuose bei padėklo storis. Nustatyta, kad modų, sklindančių plyšine linija, skaičių galima keisti keičiant plyšinės linijos padėklo, plyšio ir juostinių laidininkų pločius bei juostinių laidininkų išdėstymą padėklo paviršiuose. Il. 8, bibl. 10 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**L. Nickelson, M. Tamošiūnienė, S. Ašmontas, S. Tamošiūnas. Investigation of Open Slot Lines with Semiconductor Substrates //Electronics and Electrical Engineering.– Kaunas: Technologija, 2004.–No. 7(56) P.25 – 28.**

In this paper we analyzed the open slot lines with *n*-Si substrates. The slot lines we investigated electro-dynamically rigorously by method of singular integral equations. The algorithm enables one to take into account real sizes of slot lines. Dependences of the propagation constant on the frequency for different slot lines were determined. We analyzed how the substrate thickness and width, the slot width, the strip conductor width and its placement on the substrate surface affected the number of modes propagating in the slot line and what the geometric parameters of the line should be to ensure propagating of only one mode (this is important in practice). Il. 8, bibl. 10 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

**Л. Никельсон, М. Тamošюниене, С. Ашмонтас, С. Тamoшюнас. Исследование открытых щелевых линий на полупроводниковых подложках // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – No 7(56). P. 25 - 28.**

В данной работе методом сингулярных интегральных уравнений исследованы щелевые линии (ЩЛ) на полупроводниковых *n*-Si подложках. Электродинамическая задача для расчета характеристик щелевых линий решена в строгой электродинамической постановке. Определены дисперсионные зависимости линии с полосковыми проводниками разной ширины. Исследованы ЩЛ, у которых полосковые проводники неодинаковой ширины расположены на одной и на противоположных поверхностях подложки симметрично и асимметрично по отношению к ее краям. Проанализированы зависимости характеристик ЩЛ от ширины щели между полосками, ширины полосковых проводников, их места нахождения на одной и на противоположных поверхностях подложки и толщины подложки. Определены размеры щели, при которых ЩЛ становится одномодовой. Ил. 8, библи. 10 (на литовском языке; рефераты на литовском, русском и английском яз.).



DOI: 10.5755/j02.eie.10874