

(11) Patent numeris: **3789**

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: **H01L 21/66**

(21) Paraiškos numeris: **95-027**

(22) Paraiškos padavimo data: **1995 03 13**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **1995 09 25**

(45) Patent paskelbimo data: **1996 03 25**

(72) Išradėjas:  
**Laimis Laurinavičius, LT**

(73) Patent savininkas:  
**Vilniaus technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, 2054 Vilnius, LT**

---

(54) Pavadinimas:  
**Krūvininkų koncentracijos ir judrumo puslaidininkiuose bei pusmetaliuose  
lokalaus nustatymo būdas**

(57) Referatas:

Išradimas leidžia supaprastinti matavimą, matuoti storų daugiasluoksnių sandarų paviršinių sluoksnių parametrus.

Tikslas pasiekiamas tuo, kad tiriamą plokštelės pavidalo pavyzdį veikia statmenas didžiosioms plokštelės plokštumoms nuolatinis magnetinis laukas, lokaliaje jo paviršiaus vietoje sužadina AD magnetinį lauką induktyviuoju zondų, patalpintu didžiojoje plokštelės plokštumoje, kitu induktyviuoju zondų registruoja EVJ, sukuriamą paviršiuje per pavyzdį praėjusio magnetoplazminės bangos pluoštelio ir atraminio signalo, esant skirtingoms nuolatinio magnetinio lauko reikšmėms, nustato EVJ priklausomybės nuo nuolatinio magnetinio lauko ekstremumus ir parametrus apskaičiuoja pagal formulę. Lokalinį AD lauką kuria atžvilgiu nuolatinio magnetinio lauko neorientuotas induktyvusis zondas, EVJ indukuoja taip pat plokštelės plokštumoje neorientuotas induktyvusis zondas, patalpintas tame pačiame plokštelės paviršiuje kaip ir žadinantysis zondas, tačiau už pastarojo ribų, o registracijai naudoja EVJ, kuriamą žadinančiojo zondo ir bangos atspindžio nuo vidinės sluoksnio sienelės.

Išradimas priklauso matavimo technikos sričiai ir gali būti panaudotas lokaliniam krūvininkų koncentracijos bei judrumo nustatymui įvairios sandaros puslaidininkių ir pusmetalių sluoksniuose.

Žinomas būdas krūvininkų koncentracijai nustatyti tam tikrose tiriamo pavyzdžio vietose (TSRS a.l. Nr. 1038891), panaudojant SAD elektromagnetines bangas-helikonus. Šiuo būdu nustatant krūvininkų koncentraciją, tiriamą pavyzdį patalpina į nuolatinį magnetinį lauką, pavyzdžio paviršiuje siaurėjančiu metalizuotu dielektriniu bangolaidžiu sukuria SAD elektromagnetinį lauką, statmeną nuolatiniam magnetiniam laukui. Bangolaidžiu analogišku žadinančiajam bangolaidžiui kitoje pavyzdžio pusėje indukuoja helikoninių bangų laukus, statmenus nuolatiniam magnetiniam laukui. Tiek indikacinį, tiek žadinantį bangolaidžius orientuoja išilgai nuolatinio magnetinio lauko ir išdėsto per tiriamą pavyzdį vieną prieš kitą. Registruoja suminį signalą, proporcingą SAD bangų laukams ir atraminiam signalui. Matuojamos medžiagos krūvininkų koncentraciją apskaičiuoja pagal užfiksuotas nuolatinio magnetinio lauko vertes, atitinkančias sumarinio signalo ekstremalias vertes.

Aprašytu būdu negalima parametrų matuoti storuose pavyzdžiuose (kanale, kurio storis viršija 1,5 mm), esant krūvininkų koncentracijos vertėms, didesnėms nei  $10^{22} \text{m}^{-3}$ . Šis ribojimas susijęs su labai trumpais SAD bangų ilgiais puslaidininkiuose, dideliais slopinimais (slopinimas proporcingas  $\omega$ , kur  $\omega$  - bangos dažnis) nurodytoms koncentracijos vertėms. Šis būdas netinka parametrų matuoti sandarose puslaidininkis-metalas. Matuojant nurodytuoju būdu yra būtina griežta žadinančiojo ir indikuojančiojo bangolaidžių orientacija.

Siūlomam būdai artimiausias yra aukštadažnis (AD) krūvininkų koncentracijos lokalaus nustatymo būdas, nesimetriškai žadinant ir indikuojant magnetoplazminį Gauso pluokštelį (TSRS a.l. Nr. 1313269). Matuojant nurodytu būdu, tiriamą plokštelės pavidalo pavyzdį patalpina į nuolatinį magnetinį lauką, statmeną didžiosioms plokštelės plokštumoms.

Prie vienos iš didžiųjų plokštumų orientuotu AD zonu sukuria AD lauką, lygiagretų nuolatiniam magnetiniam laukui, ir toje vietoje sužadina magnetoplazminių bangų pluoštelį. Plokštelės plokštumoje, kuri priešinga žadinamajai, lygiagrečiai nuolatiniam magnetiniam laukui orientuotu induktyviuoju zonu indukuoja praėjusios pavyzdį bangos signalą. Registruoja šio signalo priklausomybės nuo nuolatinio magnetinio lauko indukcijos B ekstremalias reikšmes ir pagal formules apskaičiuoja matuojamus parametrus. Šis būdas tinka aukštesnėms krūvininkų koncentracijoms storesniuose pavyzdžiuose lokaliai matuoti, t.y. galimas matavimas ir pusmetaliniuose pavyzdžiuose, tačiau negalimas - daugiasluoksnių sudėtingų sandarų sluoksniuose. Kadangi metalai nepraleidžia AD bangų, būdas netinka sandarų puslaidininkis-metalas, pusmetalis-metalas matavimams. Būdo trūkumas yra ir tas, kad būtina griežta zonų orientacija bei išdėstymas tiek vienas kito, tiek nuolatinio magnetinio lauko atžvilgiais, nes matavimui reikalinga tik lygiagrečioji nuolatiniam laukui kintamojo magnetinio lauko komponentė centrinėje pluoštelio srityje. Be to, būtinas zonų prispaudimas prie tiriamojo pavyzdžio, tai apsunkina matavimą.

Išradimo tikslas - matavimo supaprastinimas dėl induktyviųjų zonų konstrukcijos supaprastinimo, orientacijos ir prispaudimo operacijų panaikinimo, o taip pat galimybė lokaliai matuoti parametrus paviršiniuose storos daugiasluoksnės sandaros sluoksniuose.

Išradimo esmė ta, kad būde, skirtame lokaliai elektriniams fizikiniams krūvininkų parametrams puslaidininkiuose bei pusmetaliuose nustatyti, tiriamą plokštelės pavidalo pavyzdį veikia statmenas didžiosioms plokštelės plokštumoms nuolatinis magnetinis laukas, žadinančiuoju induktyviuoju zonu, patalpintu didžiojoje plokštelės plokštumoje, žadina AD magnetinį lauką, kitu zonu registruoja EVJ, naudojant atraminio signalo ir praėjusio pavyzdį magnetoplazminės bangos signalo interferenciją, nustato EVJ priklausomybės nuo nuolatinio magnetinio lauko ekstremumus, fiksuoja magnetinio lauko vertes, esant ekstremumams ir pagal formulę apskaičiuoja parametrus. AD magnetinį lauką kuria neorientuotu nuolatinio lauko atžvilgiu žadinančiuoju zonu, EVJ registruoja taip pat neorientuotu

indikaciniu zondų, patalpintu greta žadinančiojo, už pastarojo ribų. Registravimui naudoja EVJ, kuriamą žadinančiojo zondo ir magnetoplazminės bangos, atsispindėjusios nuo kito matuojamo sluoksnio paviršiaus.

- 5 Pasiūlytame būde, kaip ir prototipo atveju, pavyzdį (plokštelę) patalpina į nuolatinį magnetinį lauką, statmeną didžiosioms pavyzdžio plokštumoms. Prototipo atveju prie vienos iš didžiųjų pavyzdžio plokštumų orientuotu induktyviuoju zondų, kurio ašis statmena didžiosioms pavyzdžio plokštumoms, žadina AD magnetinį lauką, lygiagretų nuolatiniam laukui, o
- 10 kitoje pavyzdžio plokštumoje, priešingoje žadinančiajai, taip pat orientuotu induktyviuoju zondų, kurio ašis sutampa su žadinančiojo zondo ašimi, matuoja AD magnetinio lauko dedamąją, lygiagrečią nuolatiniam magnetiniam laukui. Išmatavę AD magnetinio lauko priklausomybę nuo nuolatinio magnetinio lauko, pagal charakteringus taškus nuolatinio
- 15 magnetinio lauko skalėje, atitinkančius Relėjaus ekstremumus (praėjusios pavyzdį bangos ir atraminio signalo interferencija), apskaičiuoja matuojamąjį parametą.

- Fig.1 pateikta prietaiso, realizuojančio siūlomą būdą, funkcinė schema, o Fig.2 - pavaizduotas zondų išdėstymas matavimo metu. Fig.3
- 20 pavaizduota išėjimo signalo priklausomybė nuo nuolatinio magnetinio lauko dydžio.

- Ivesti šie žyminiai: 1 - tiriamasis pavyzdys; 2 - AD signalo perdavimo matuoklis (pvz., BM-538); 3 - žadinantysis zondas; 4 - indikacinis zondas (zondų forma ir jų išdėstymas matuojamame paviršiuje - laisvas); 5 - dviejų
- 25 koordinačių savirašis prietaisas; 6 - Holo daviklis; 7 - folguota dielektrinė plokštelė; 8,9 - AD koaksialiniai kabeliai, jungiantys zondus su perdavimo matuokliu 2.

- Matuojant siūlomu būdu metalizuotą pavyzdį 1 patalpina tarp elektromagneto polių, t.y. į nuolatinį magnetinį lauką, statmeną didžiosioms
- 30 pavyzdžio 1 plokštumoms. Elektrinis AD signalas iš perdavimo matuoklio 2, koaksialiniu kabeliu 8 patekęs į zondą 3, lokaliai pavyzdžio 1 vietoje sukuria AD magnetinį lauką b, laisvai orientuotą nuolatinio magnetinio lauko B

atžvilgiu. Esant tam tikro dydžio nuolatiniam magnetiniam laukui B pavyzdžio 1 vietoje, kuri aktyviai sąveikauja su žadinančiuoju zonu 3, susižadina magnetoplazminių helikoninių bangų pluoštelis, kuris sklinda išilgai magnetinio lauko su nedidele sklaida ( Излучение точечного

5 источника в замагниченную полупроводниковую плазму. ФТП. 1986. т.20. 11. с.2092-2097.).

Nustatyta, kad tokio magnetoplazminių bangų pluoštelio dispersija sutampa su plokščios helikoninės bangos dispersija, o kampinė sklaida priklauso nuo puslaidininkio parametrų ir nuo nuolatinio magnetinio lauko dydžio. Atsispindėjęs nuo antrosios didžiosios pavyzdžio plokštumos (nuo sandaros sluoksnio ribos) bangų pluoštas išplinta ir registruojamas indikaciniu zonu 4, kuris patalpintas vienoje plokštumoje su žadinančiuoju zonu 3 už pastarojo ribų. Zondas 4 indukuoja atžvilgiu B laisvai orientuotą b komponentę, kuriamą žadinančiojo zondo 3.

15 Zonu 4 indukuotas signalas kabeliu 9 patenka į prietaiso 2 įėjimą, kurio analoginis išėjimas sujungtas su savirašio 5 Y-kanalu. Į savirašio 5 X-kanalą patenka proporcingas nuolatiniam magnetiniam laukui Holo jutiklio 6 signalas. X-Y savirašis 5 užrašo perdavimo koeficiento modulio  $|A|$  priklausomybę nuo B tarp zonų 3 ir 4.

20 Nustatę du gretimus ekstremumus (žiur. Fig.3) ir užfiksavę atitinkančias juos nuolatinio magnetinio lauko vertes, pagal formulę apskaičiuoja krūvininkų koncentraciją n:

$$25 \quad n = \frac{A}{d^2 f (B_2^{-1/2} - B_1^{-1/2})^2} \quad (1)$$

Čia A - konstanta, d - pavyzdžio (sluoksnio) storis, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> - nuolatinio magnetinio lauko vertės, atitinkančios du gretimus ekstremumus.

30 Kita viena pavyzdžio 1 didžiųjų plokštumų - metalizuota, keičiasi bangų pluoštelio atspindžio sąlygos - turime ketvirčio bangos rezonansą.

Jei rezonanso laipsnis yra žinomas, krūvininkų koncentraciją  $n$  apskaičiuoja pagal formulę:

$$n = \frac{A B_K K^2}{f d^2} \quad (2)$$

Čia  $K$  - rezonanso laipsnis 1,2,3,...;  $B_K$  - nuolatinio magnetinio lauko indukcija, atitinkanti priklausomybės  $|A| = f(B)$  maksimumą, t.y.  $K$ -jo laipsnio rezonansą.

Būdas leidžia nustatyti ir krūvininkų judrumą  $\mu$ . Tam būtina žinoti rezonansų  $|A| = f(B)$  amplitudes  $A$ . Judrumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\mu = \frac{\pi (B_2^{-3/2} - B_1^{-3/2})}{2 \ln [A_1/A_2 (B_2/B_1)^{1/2}] (B_2^{-1/2} - B_1^{-1/2})} \quad (3)$$

Tokiu būdu, ta aplinkybė, kad magnetoplazminių bangų pluoštelis sklinda išilgai magnetinio lauko krypties erdviškai plisdamas ir atsispindi nuo sluoksnio sienelių sandarose puslaidininkis-dielektrikas, pusmetalis-dielektrikas arba puslaidininkis-metalias, pusmetalis-metalias, leidžia lokaliai matuoti medžiagų elektrinius fizikinius parametrus storose sandarų sluoksniuose. Kadangi bangų pluoštelį žadina ir indukuoja laisvai orientuotais induktyviaisiais zondais, pluoštelio dispersija sutampa su plokščios helikoninės bangos dispersija, o atraminiu signalu naudojama žadinančiojo zondo kintamojo magnetinio lauko dedamoji, leidžia supaprastinti matavimo procesą, atsisakant zondu tikslios orientacijos ir išdėstymo vienas kito atžvilgiu, nuolatinio magnetinio lauko atžvilgiu, o taip pat atsisakant zondu prispaudimo prie pavyzdžio.

Žemiau pateiksime konkrečių puslaidininkinių medžiagų elektrinių fizikinių parametrų matavimus aukščiau aprašytu būdu.

Indikacinis ir žadinantysis zondai - mažos, iš varinio 0,15 mm skersmens laido laisvai suvyniotos ritelės. Perdavimo koeficiento modulio

- $|A|$  tarp zonų priklausomybės nuo  $B$  forma nustatyta prietaisu BM-538 ir kreivės pateiktos Fig.3: pirmoji kreivė išmatuota  $\text{Bi}_{0,97}\text{Sb}_{0,03}$  pavyzdžiui,  $\mu = 20 \text{ m}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , esant pavyzdžio temperatūrai  $T = 77 \text{ K}$ ,  $B \parallel C_3$ , kur  $C_3$  - trigonalinė monokristalo ašis, signalo dažnis  $f = 100 \text{ MHz}$ ,  $d = 1,0 \text{ Omm}$ .
- 5 Apskaičiuota krūvininkų koncentracija  $n = 2,0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ . Antroji kreivė nuimta  $n\text{-InSb}$  pavyzdžiui,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $f = 36 \text{ MHz}$ ,  $d = 5,75 \text{ mm}$ , ir apskaičiuoti parametrai:  $n = 1,85 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ,  $\mu = 6,9 \text{ m}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Trečioji kreivė nuimta metalizuotam  $n\text{-InSb}$  pavyzdžiui,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $f = 101 \text{ MHz}$ ,  $d = 1,5 \text{ mm}$  ir naudojantis (2) ir (3) formulėmis apskaičiuoti parametrai:  $n = 1,77 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ,  $\mu = 6,5 \text{ m}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .
- 10

## IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

Krūvininkų koncentracijos ir judrumo puslaidininkiuose bei  
5 pusmetaliuose lokalaus nustatymo būdas pasireiškia tuo, kad plokštelės  
pavidalo pavyzdį veikia nuolatinis magnetinis laukas, žadinantysis  
induktyvusis zondas, patalpintas ant plokštelės didžiosios plokštumos lokaliai  
žadina aukšto dažnio magnetinį lauką, EVJ registruoja indukcinis  
induktyvusis zondas pagal atraminio signalo ir paviršiuje indukuoto, praėjusio  
10 sluoksnį magnetoplazminių bangų pluošto signalo interferenciją, nustato  
interferencinio signalo ekstremumus priklausomai nuo nuolatinio magnetinio  
lauko, apskaičiuoja parametrus pagal formulę, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad  
AD magnetinį lauką žadina nuolatinio magnetinio lauko atžvilgiu  
neorientuotas zondas, turintis laisvą vijų išdėstymą, EVJ registruoja taip pat  
15 atžvilgiu nuolatinio magnetinio lauko neorientuotas induktyvusis zondas,  
patalpintas tame pačiame pavyzdžio paviršiuje kaip ir žadinantysis zondas,  
tačiau už žadinančiojo zondo ribų, o registracijai naudoja EVJ, kuriama  
žadinančiojo zondo ir nuo kitos pavyzdžio plokštumos atsispindėjusio  
magnetoplazminių bangų pluošto signalų.

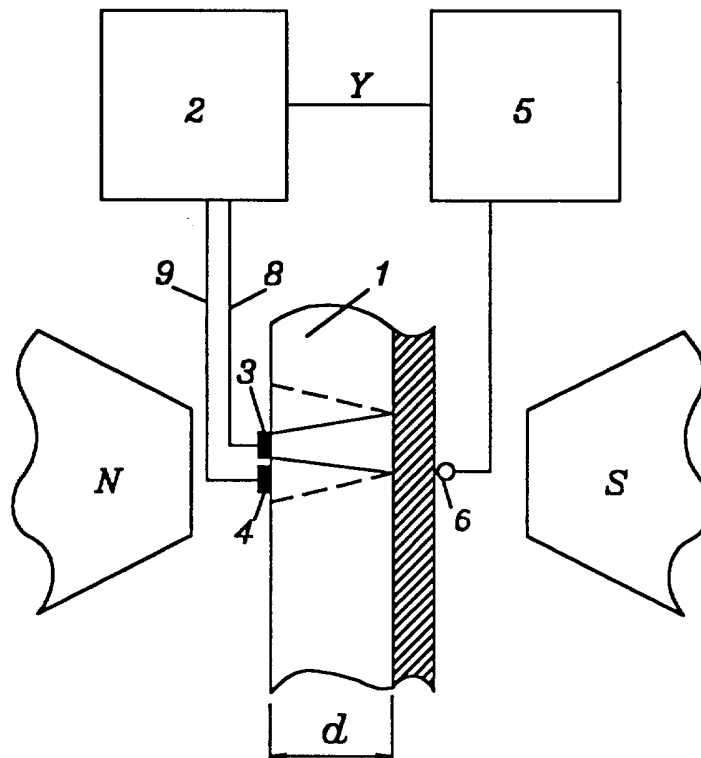


Fig.I

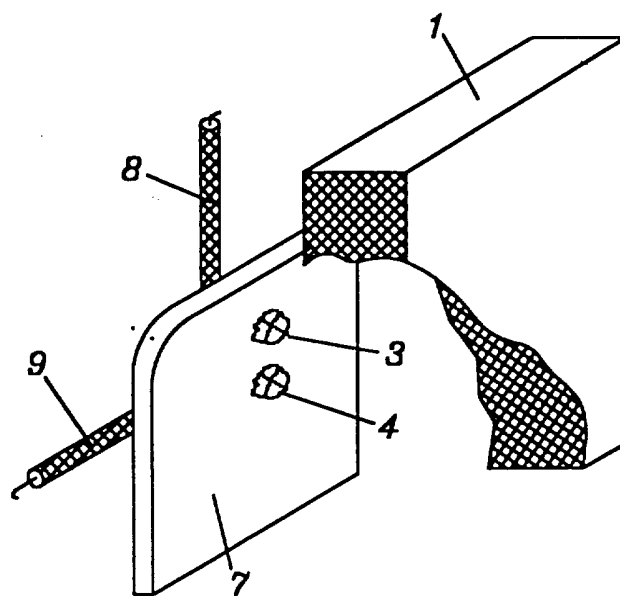


Fig. 2

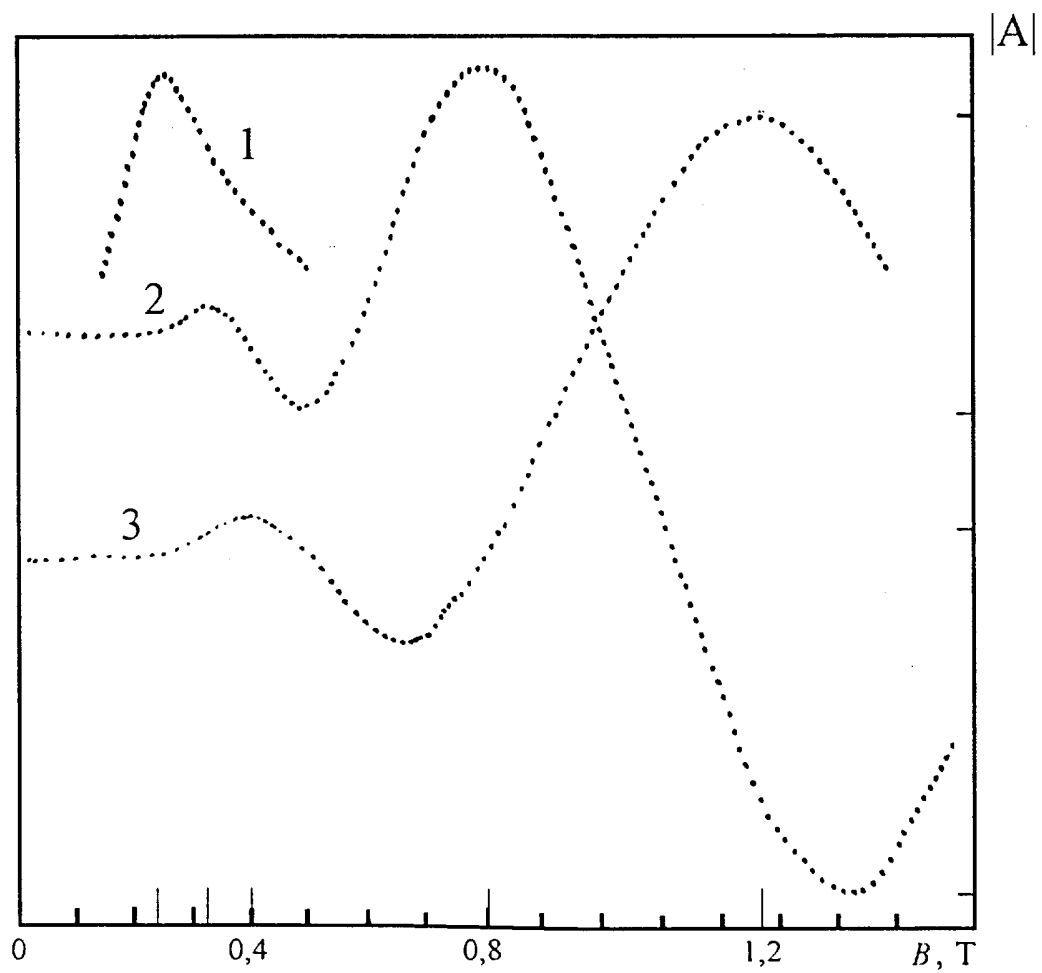


Fig.3