

Mikroelektroninio krūvio keitiklio jautrio didinimo būdas

S. Sakalauskas

Puslaidininkų fizikos katedra, Vilniaus universitetas,

Saulėtekio al. 9, III korp., LT–10222 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2366029, el. p. stanislavas.sakalauskas@ff.vu.lt

Z. Vaitonis, R. Pūras

Medžiagotyros ir taikomųjų mokslų institutas, Vilniaus universitetas,

Saulėtekio al. 9, III korp., LT–10222 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2366026, el. p. romualdas.puras@ff.vu.lt

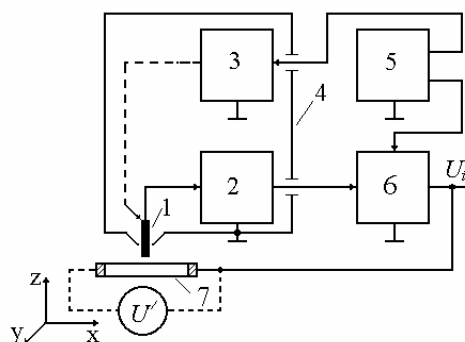
Įvadas

Plačiatarpės puslaidininkinės medžiagos, pvz., GaN, SiC, jau kuris laikas sėkmingai gaminamos, bandomos ar net naudojamos ilgalaikės veikos jonizuojančiosios spinduliuotės detektorių, artimojo ultravioleto šviesos šaltinių ir kitų netradicinės paskirties puslaidininkinių ir optoelektroninių komponentų gamyboje. Reikiamiems darinių parametrams užtikrinti, be kitų, didelę reikšmę turi ir medžiagų paviršinės savybės, kurios dėl paviršiaus iš aplinkos įgertų atomų gali iš esmės pakeisti šių darinių savybes. Šiuo metu paviršiams tirti ir kontroliuoti taikomi įvairūs būdai, tarp jų ir nesąlytinis Kelvino ir Zismano būdas [1]. Taikant pastarąjį būdą galima sukurti labai universalius matuoklius ir pasiekti skiriamąją gebą, geresnę negu $1 \mu\text{m}$ [2, 3], kurią iš esmės sąlygoja virpančiojo mikroelektrodo viršūnėlės skersmuo. Mažo skersmens virpančiojo mikroelektrodo viršūnėlė su tiriamojo kūno paviršiumi sudaro mažą talpą (taip pat ir jos pokytį), palyginti su elektroninio mazgo parazitine įėjimo talpa, o tai labai mažina talpinio keitiklio perdavimo koeficientą ir jautrį.

Šio darbo tikslas – išnagrinėti, kaip galima padidinti didelės erdvinės skiriamosios gebos talpinio keitiklio, kaip pagrindinio paviršinio elektrinio potencialo matuoklio mazgo, jautrį, taikant elektrinę parazitines talpos kompensaciją.

Talpinis paviršinio elektrinio potencialo matuoklis

Daug informacijos apie tiriamų puslaidininkinių medžiagų ir jų darinių paviršines savybes duoda jų paviršinis elektrinis potencialas (PEP), jo pasiskirstymas ir kinetika [4], o PEP ir jo pasiskirstymui matuoti gerai tinka matuoklis su talpinio keitikliu, kurio supaprastinta struktūrinė schema parodyta 1 pav. Tokio matuoklio veikimo esmė tokia: tiriamojo bandinio paviršius ir arti jo virpanti mikroelektrodo viršūnėlė sudaro talpą, kurios krūvis, proporcingas PEP vertei φ , keičiamas į mikroelektrodo virpėjimo dažnio kintamąją įtampą, kuri toliau stiprinama ir demoduluojama, o šimtaprocentinis neigiamas grįžtamasis ryšys, apimantis ir tiriamąjį bandinį,



1 pav. PEP matuoklio struktūrinė schema: 1–virpantis matavimo mikroelektrodas, 2–pirminis didelės įėjimo varžos įtampos stiprintuvas, 3–pjezoelektrinė mikroelektrodo virpinimo ir perstūmimo sistema, 4–galvutės korpusas, 5–generatorius su fazės keitikliu, 6–įtampos stiprintuvas su sinchroniniu detektoriumi ir žemojo dažnio filtru, 7–tiriamasis bandinys (ant koordinatinio stalo), prie kurio gali būti prijungtas įtampos šaltinis

užtikrina didelį matavimo tikslumą [5]. Priminsime, kad matuoklio išėjimo įtampa, pasibaigus pereinamajam procesui, bus

$$U_{i\bar{s}} = -\varphi K / (1 + K); \quad (1)$$

čia K – bendras įtampos stiprinimo koeficientas grįžtamąjo ryšio grandinėje. Paprastai būna $K \geq 10^3$, todėl

$$U_{i\bar{s}} \approx |\varphi|, \quad (2)$$

o elektrinio lauko stipris E mikroelektrodo ir bandinio paviršiaus tarpelyje bus nedidelis, nes

$$E = \varphi / [(1 + K)h]; \quad (3)$$

čia h – tarpelio skaitinė vertė.

Matuoklio erdvinė skiriamoji geba

$$S \cong D \sqrt{1 + 4h^2 / D^2}; \quad (4)$$

čia D – mikroelektrodo viršūnėlės skersmuo.

Anksčiau pateiktos išraiškos leidžia įvertinti pagrindinius matuoklio parametrus, išskyrus įtampos ribinį jautrį, kurį lemia paties talpinio keitiklio ir pirminio didelės įėjimo varžos įtampos stiprintuvo parametrai. Jautriui apskaičiuoti būtina žinoti ne tik konkrečius talpinio keitiklio parametrus, bet ir didelės įėjimo varžos stiprintuvo pakopos įėjimo srovės ir parazitinės talpos bei žemadažnės triukšmų varžos vertes. Šiuolaikinių sandūrinių lauko tranzistorių užtūros ar elektrometrinių operacinių stiprintuvų (OS) įėjimo srovės yra labai silpnos, pvz., tranzistoriaus 2N4117A ir OS TLO72A šių srovių vertės retai viršija 20 pA, todėl, įvertinę literatūroje [6] aptartus triukšmų ypatumus ir atmetę šratinio reiškinio sąlygotą triukšmų sandą bei laikydami, kad signalo ir triukšmo santykis lygus vienetui, ribinį talpinio keitiklio įtampos jautrį galėsime išreikšti taip:

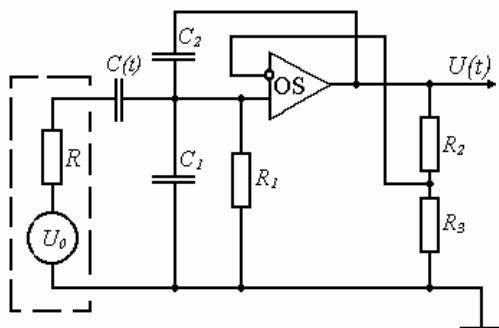
$$U_{\min} \geq \frac{C_0 + C_1}{\omega \Delta C C_0} \sqrt{4kT\Delta f (R_1^{-1} + R_t \omega^2 C_1^2)}; \quad (5)$$

čia C_0 – vidutinė mikroelektrodo viršūnėlės ir tiriamojo kūno paviršiaus talpa; ΔC – šios talpos pokytis (dėl mikroelektrodo virpėjimo kampiniu dažniu ω); C_1 , R_1 – stiprintuvo įėjimo talpa ir varža; k – Bolcmano konstanta; T – termodinaminė temperatūra; Δf – dažnių juosta; R_t – žemadažnė stiprintuvo triukšmų varža.

Iš (5) išraiškos išeina, kad efektyviai didinti jautrį galima tik mažinant talpos C_1 vertę, tačiau šiuolaikinės techninės ir technologinės priemonės neleidžia to padaryti, todėl telieka vienas būdas – elektrinė talpos kompensacija.

Pirminio įtampos stiprintuvo įėjimo talpos kompensavimas

Šio mazgo principinė elektrinė schema parodyta 2 paveikslėlyje. Nuo klasikinio varianto ji skiriasi tik



2 pav. Tipinė talpinio keitiklio ir pirminio didelės įėjimo varžos įtampos stiprintuvo principinė elektrinė schema. Parazitinei talpai C_1 kompensuoti sudaromas grįžtamas ryšys per kondensatorių C_2 , o U_0 , R yra bandinio ekvivalentas

kondensatoriaus C_2 įjungimu (dėl jo gaunamas teigiamas grįžtamas ryšys). Iš pirmo žvilgsnio tai būtų gana elementari grandinė, jei nebūtų parametrinės talpos (virpantysis matavimo mikroelektrodas – bandinio paviršius) $C(t)$, kuri labai apsunkina šios grandinės matematinę analizę. Mūsų turima patirtis rodo, kad, esant

mažiems talpos pokyčiams, t. y. $\Delta C \ll C_0$, vyrauja tik mikroelektrodo virpėjimo dažnio elektrinis signalas, nes $\int_0^T C(t) dt = C_0$; čia T – mikroelektrodo virpėjimo periodas.

Turėdami tai omenyje ir tarę, kad OS įėjimo srovė ir rezistoriumi R_1 tekanti srovė yra labai silpnos, šio mazgo pereinamoji charakteristika galėtų būti išreikšta taip:

$$U(p)/U_0 \approx K_1 / \{p^2 \tau R (C_1 + C_2) + p[RC_1 + RC_2(1 - K_1)] + \tau \frac{C_0 + C_1 + C_2}{C_0} + \frac{C_0 + C_1 + C_2(1 - K_1)}{C_0}\}; \quad (6)$$

čia p – Laplaso operatorius; τ , K_1 – OS laiko pastovioji ir stiprinimo koeficientas.

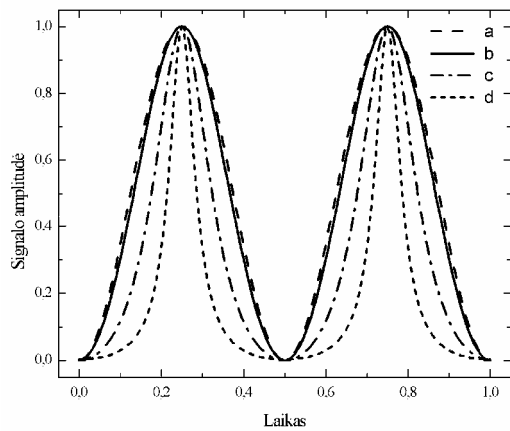
Ši išraiška rodo, kad pereinamojo proceso trukmė, o kartu ir atstojamoji įėjimo talpa, priklauso nuo pasirinktos OS stiprinimo koeficiento K_1 vertės. Optimali OS įėjimo talpos kompensacija bus tada, kada (6) lygties vardiklio šaknys bus lygios, t. y. kada stiprinimo koeficientas

$$K_1' = [RC_0(C_1 + C_2) - \tau(C_1 + C_2 - C_0) + 2\sqrt{\tau C_0(C_1 + C_2)(RC_0 - \tau)}] / RC_0 C_2. \quad (7)$$

Eksperimentų rezultatai

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami su talpinio keitikliu ir pirminiu įtampos stiprintuvu, kurio principinė elektrinė schema parodyta 2 pav. Taip pat buvo atlikti eksperimentai su aptariamoju mazgu, kuriame OS TLO72A buvo pakeistas dvipakopių sandūrinių lauko tranzistorių 2N4117A įtampos stiprintuvu. Šio stiprintuvo parazitinė įėjimo talpa buvo beveik dvigubai mažesnė (~5 pF) už OS, tačiau jo užimamas tūris buvo nepalyginamai didesnis, todėl tolesni tyrimai buvo atlikti naudojant OS.

Teoriniams rezultatams kiekybiškai patikrinti buvo atlikti eksperimentai su aptariamoju mazgu, kuriame virpantysis elektrodas buvo žymiai didesnių geometrinių matmenų, nes tai leido pakankamu tikslumu kontroliuoti vidutinę talpą C_0 ir šios talpos pokytį ΔC (eksperimente šios talpos buvo parenkamos tokiuose intervaluose: $C_0 = (0,5 \dots 1,0)$ pF ir $\Delta C = (0,01 \dots 0,05)$ pF, C_2 talpa buvo 4,3 pF). Šie tyrimai parodė, kad esant optimaliai kompensacijai stiprintuvo parazitinė įėjimo talpa sumažėja apie 100 kartų, o išėjimo signalas būna beveik harmoninis (žr. 3 pav., b kreivė), t. y. aukštesniųjų eilių harmonikų amplitudės paneigtinai mažos. Kai stiprintuvo stiprinimo koeficientas yra didesnis už apskaičiuotą pagal (7) išraišką, išėjimo signalo forma gerokai skiriasi nuo harmoninės (3 pav. c ir d kreivės). 3 pav. parodytos OS išėjimo signalų formos, esant normuotoms jų amplitudėms, nes, kompensuojant stiprintuvo įėjimo talpą, gerokai padidėja išėjimo signalo amplitudė. Kiti tyrimai buvo atlikti su tuo pačiu stiprintuvu tik pakeitus minėtą didesnių geometrinių matmenų talpinį keitiklį virpančiuoju mikroelektrodu, kurio viršūnėlės suapvalinimo spindulys buvo apie (0,4...0,5) μm . Šiuo atveju daugiausia dėmesio skyrėme mazgo ribinio jautrio įvertinimui, kada stiprintuvas veikia optimaliu talpos kompensacijos režimu. Nustatėme, kad, kai žemojo dažnio filtro laiko pastovioji lygi 1 s, galima



3 pav. Stiprintuvo išėjimo signalo forma: b – kai K_1^I optimalus; c, d – kai $K_1^I < K_1^{II} < K_1^{III}$; a – harmoninis signalas palyginimui

registruoti 1 mV paviršinio potencialo vertes. Tai gerokai didesnė vertė, negu gauta iš (5) išraiškos. Matyt, tai susiję su išorinių elektromagnetinių laukų įtaka virpančiajam mikroelektrodui (jo visiškai ekranuoti negalima), be to, jis virpa ne vien tik išilgine ašimi (tai susiję su keitiklio konstrukcija [3]), o teoriniuose skaičiavimuose parametrinė grandinė pakeista į paprastą.

Išvados

1. Pirminio įtampos stiprintuvo parazitinę įėjimo talpą galima sumažinti apie 100 kartų. Didesnis talpos mažinimas susijęs su žadinimosi pavojumi.
2. Optimali talpos kompensacija leido mikroelektroninio krūvio keitiklio jautrį padidinti beveik 10 kartų.

Literatūra

1. **Lüth H.** Surfaces and interfaces of solid materials.–Berlin: Springer, 1997.–556 p.
2. **Bussmann E., Williams C.C.** Sub–10 nm lateral spatial resolution in scanning capacitance microscopy achieved with solid platinum probes // Rev. Sci. Instrum. 2004.–Vol. 75. No 2.–P. 422–425.
3. **Sakalauskas S., Pūras R.** Mikroelektroninis krūvio keitiklis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004.–Nr. 2(51). – P. 49–51.
4. **Woodruff D.P., Delchar T.A.** Modern techniques of surface science. – Cambridge university press, 1996. – 512 p.
5. **Sakalauskas S., Sodeika A.** Automatized measuring instrument of the surface electric potential and potential's distribution // Rev. Sci. Instrum. 1998.–Vol. 69. No 2.–P. 466–468.
6. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. – Москва: Мир, 1998. – 704 с.

Pateikta spaudai 2004 09 28

S. Sakalauskas, Z. Vaitonis, R. Pūras. Mikroelektroninio krūvio keitiklio jautrio didinimo būdas // Elektronika ir elektrotechnika.– Kaunas: Technologija, 2005.– Nr. 1(57).– P. 71–73.

Medžiagų paviršiams tirti ir kontroliuoti naudojami įvairūs būdai, tarp jų ir talpinis. Šis darbas skirtas didelės erdvinės skiriamosios gebos talpinio keitiklio jautriui, kurį lemia paties virpančiojo mikroelektrodo viršūnėlės skersmuo ir pirminio didelės įėjimo varžos įtampos stiprintuvo parametrai, tirti. Pateiktos ir išanalizuotos talpinio keitiklio ir pirminio didelės įėjimo varžos įtampos stiprintuvo elektrinės schemos rodo, kad jautrį galima didinti tik minimizuojant stiprintuvo įėjimo talpą, todėl pasiūlyta taikyti pirminio įtampos stiprintuvo parazitinės įėjimo talpos elektrinę kompensaciją. Atlikti eksperimentiniai tyrimai parodė, kad optimalios kompensacijos atveju stiprintuvo parazitinė įėjimo talpa sumažėja apie 100 kartų, o mikroelektroninio krūvio keitiklio, kurio virpančiojo mikroelektrodo viršūnėlės skersmuo apie 1 μm, jautris padidėja beveik 10 kartų ir siekia 1 mV. Il. 3, bibl. 6 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų, rusų k.).

S. Sakalauskas, Z. Vaitonis, R. Pūras. Method of Microelectronic Charge Converter's Sensitivity Enlargement // Electronics and Electrical Engineering.– Kaunas: Technologija, 2005.– No. 1(57).– P. 71–73.

Various methods are used for investigation and control of materials' surface including capacitive method. The paper deals with high spatial resolution microelectronic charge converter's sensitivity study. The sensitivity is determined by diameter of converter's tip and parameters of primary high input resistance voltage amplifier. The analysis of electric diagrams of capacitive converter and high input resistance primary voltage amplifier disclosed that sensitivity enlargement is possible only by reducing amplifier's input stray capacitance. That is why primary voltage amplifier's input stray capacitance electrical compensation was suggested. The results of experiments demonstrated the reduction of amplifier's input capacitance by factor about 100 in case of optimal compensation and the enlargement of microelectronic charge converter's sensitivity by factor close to 10. Sensitivity reached 1 mV in the case of 1 μm vibrating microelectrode tip diameter. Ill. 3, bibl. 6 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

С. Сакалаускас, З. Вайтонис, Р. Пукас. Способ увеличения чувствительности микроэлектронного преобразователя заряда // Электроника и электротехника.– Каунас: Технология, 2005.– № 1(57).– С. 71–73.

Для исследования и контроля поверхностных свойств материалов применяются различные способы, в том числе и емкостной. Настоящая работа посвящена исследованию увеличения чувствительности емкостного преобразователя с высоким пространственным разрешением. Чувствительность определяют диаметр вершины вибрирующего микроэлектрода и параметры первичного усилителя напряжения с большим входным сопротивлением. Анализ представленных электрических схем емкостного преобразователя и первичного усилителя напряжения с высоким входным сопротивлением показали, что увеличение чувствительности возможно только при снижении входной емкости, поэтому предложено применить электрическую компенсацию паразитной входной емкости первичного усилителя напряжения. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при оптимальной компенсации можно снизить паразитную входную емкость усилителя приблизительно в 100 раз, а чувствительность микроэлектронного преобразователя электрического заряда с вибрирующим микроэлектродом, диаметр вершины которого около 1 μm, увеличить почти в 10 раз и достичь 1 mV. Ил. 3, bibl. 6 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).