

Lokalojo oksidavimo technologijos kokybės tyrimas

R. Anilionis, T. Keršys

Elektronikos inžinerijos katedra, Kauno technologijos universitetas

Studentų g. 50, 51368 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 300503, el. pastas romualdas.anilionis@ktu.lt; tomas.kersys@ktu.lt

Įvadas

Puslaidininkinių integrinių grandynų (IG) elementai formuojami paviršiniame puslaidininkio padėklo sluoksnyje. Padėklas yra gana laidus srovei ir, jeigu to nepaisoma, tarp elementų atsiranda stiprūs parazitiniai ryšiai ir dėl to IG neveikia. Siekiant šiuos ryšius panaikinti arba gerokai susilpninti, elementus reikia izoliuoti vieną nuo kito.

Izoliavimo metodų yra daug. Visus juos galima suskirstyti į tris pagrindines grupes: izoliavimas p n sandūra, izoliavimas dielektrikais ir kombinuotas (LOCOS- local oxidation of silicon) izoliavimas. LOCOS technologija yra perspektyvi, todėl šiame straipsnyje patyrinėsime jos kokybę.

LOCOS technologija

LOCOS technologija priskiriama prie kombinuoto izoliavimo metodų, kai IG elementas iš apačios izoliuojamas pn sandūra, o iš šonų – dielektriku. Plačiau paplitusi BJT technologija [1], tačiau ji turi nemažą trūkumą, kurių yra išvengta LOCOS technologijoje.

LOCOS technologijoje naudojamos silicio plokštelės su plonu epitaksiniu sluoksniu, kuris ten, kur būtina izoliacija, yra kiaurai peroksiduojamas, naudojant apsauginę Si_3N_4 kaukę. Silicio nitridas patikimai apsaugo Si sluoksnio paviršius nuo oksidavimosi ir yra pašalinamas fosforo rūgštimi, kuri nereaguoja su SiO_2 .

Yra keletas pagrindinių LOCOS technologijos variantų. Išnagrinėsime kai kurių variantų technologinius procesus.

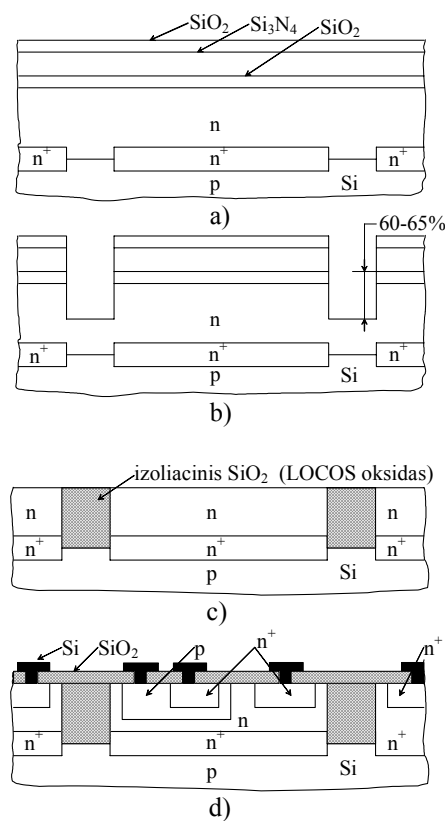
Technologija LOCOS-1. Jos eiga parodyta 1 pav. [2]. Pradžioje ant p laidumo padėklo formuojamas stibiu gausiai legiruotas n^+ sluoksnis. Šiuo atveju galima naudoti jonų implantaciją arba difuziją. Paskui užauginamas plonas, 1-2 μm storio, epitaksinis p laidumo sluoksnis. Optimaliu laikomas 1,25 μm storio sluoksnis. Ant epitaksinio sluoksnio formuojamas SiO_2 - Si_3N_4 - SiO_2 sluoksnis.

Si_3N_4 skirtas oksidavimo procesui lokalizuoti.

Pro viršutinį SiO_2 sluoksnį – kaukę karšta fosforo rūgštimi lokaliai išdinamas Si_3N_4 . Si_3N_4 galima išdinti ir plazmoje. Tuomet viršutinis SiO_2 sluoksnis nenaudojamas, o kaukę yra fotorezistas.

Pro apsauginį Si_3N_4 sluoksnį išėsdinamas maždaug iki 60-65 % gylio epitaksinis Si sluoksnis. Paskui Si oksiduojamas iki viršaus, nes tik taip gali būti gaunamas lygus planarinis paviršius.

Toliau pagal jau žinomus technologinius procesus izoliuotose zonos formuojami IG elementai.

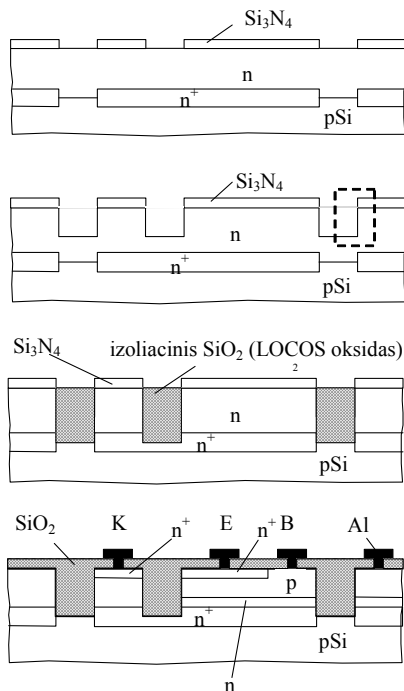


1 pav. Technologija LOCOS-1: a – padėklas su paslėptuoju epitaksiniu n^+ ir apsauginiu SiO_2 - Si_3N_4 - SiO_2 sluoksniais; b – 60-65 % išėsdytas epitaksinis Si sluoksnis; c – suformuotos izoliacinės SiO_2 sritys; d – izoliuotoje zonoje suformuotas integrinis elementas

Technologija LOCOS-2. Šis variantas skiriasi nuo prieš tai aprašyto tuo, kad emiterių šoninės sritys išeina į izoliacinį SiO_2 sluoksnį, o pokolektoriniai n^+ sluoksniai, susiję su tranzistorine struktūra per paslėptąjį, gausiai legiruotą n^+ sluoksnį, formuojami personalinėse izoliacinėse zonos.

Epitaksinio sluoksnio paviršiuje sudaromas apsauginis Si_3N_4 sluoksnis, atliekamas lokalusis Si ėsdinimas ir oksidavimas, kaip ir atliekant tokias pat technologijos LOCOS-1 operacijas. Kitų technologinių operacijų seka priklauso nuo epitaksinio sluoksnio laidumo.

LOCOS-2 technologija, pagal kurią formuojami tranzistoriai su difuzine baze, parodyta 2 pav. Šiuo atveju auginamas n laidumo epitaksinio sluoksnis. Suformavus izoliacinį SiO_2 , gaminama bazė. Tam Si_3N_4 sluoksnyje padaromi langai ir atliekama akceptorinių priemaišų difuzija, tuo pačiu metu formuojami ir difuziniai rezistoriai. Vėliau pašalinamas Si_3N_4 , paviršius termiškai oksiduojamas, padaromi langai emiteriui ir pokolektoiniam n^+ sluoksniui. Procesas baigiamas metalizacija, o po jos - fotolitografija.



2 pav. Technologija LOCOS - 2 formuojami integriniai elementai

LOCOS technologijos kokybės problemos

Pagrindinės problemos, su kuriomis susiduriama LOCOS technologijoje:

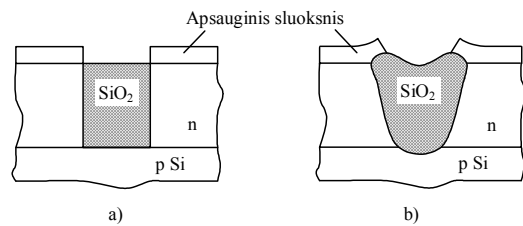
1) Si_3N_4 sluoksnio cheminė struktūra nereguliari, jame pasitaiko kiaurymių, įtrūkimų, todėl į Si_3N_4 formavimą būtina atkreipti ypatingą dėmesį;

2) atliekant Si oksidavimą, deguonies molekulės prasiskverbia po maskuojamuoju Si_3N_4 sluoksniu, todėl paviršius darosi nelygus (3 pav.). Iškilimai gana dideli, iki 0,3-0,6 μm . Patys iškilimai metalizacijos defektų nepadidina, bet pakelia Si_3N_4 , kuriame atsiranda įtrūkimų, taip pat trukdo fotolitografijos procesui;

3) būtinas didelis epitaksinio Si sluoksnio storio pakartojamumas, tik tada galima kokybiškai izoliuoti IG elementus.

LOCOS technologijos pranašumas tas, kad: sumažėja kristalo plotas; supaprastėja fotošablonų sutapdinimo operacija; padidėja leistinas fotošablonų, naudojamų po izoliacinio fotošablono sluoksnio, defektų skaičius. Visi

defektai, kurie patenka ant suformuoto izoliacinio SiO_2 , įtakos neturi; galima nepaisyti šoninės difuzijos efekto, nes šoninės sienelės yra iš SiO_2 .

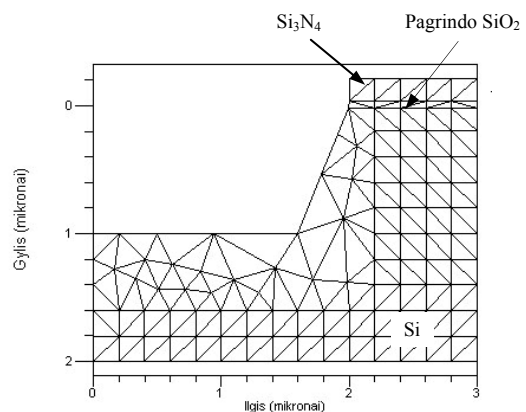


3 pav. Oksiduojamos srities profiliai: a – idealus; b – realus

Si oksido augimo modeliavimas

Silicio oksido augimo proceso matematiniam modeliavimui naudojama programa SUPREM [3], kuri buvo pritaikyta silicio oksidacijos procesui modeliuoti, panaudojant tam tikrą paprogramį. Tada programoje SUPREM parenkamas konkretaus proceso algoritmas, pagal kurį bus atliekamas matematinis modeliavimas bei įvedami pagrindiniai ir šalutiniai parametrai, reikalingi skaičiavimams. Pagrindo oksido sluoksniui taikomas spūdziojo skysčio modelis, o izoliaciniam SiO_2 sluoksniui - nespūdziojo klampaus skysčio modelis.

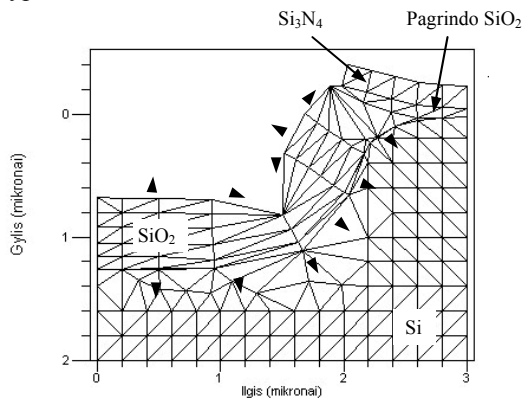
LOCOS technologijoje SiO_2 atlieka tarpelementinės izoliacijos vaidmenį. Iš pradžių Si turi būti išėsdintas (padaromi grioveliai), o tik po to atliekama Si oksidacija pro Si_3N_4 kaukę. Grioveliai silicyje visiškai užoksiduojami. Priklausomai nuo ėsdinimo technologijos gali būti gaunami skirtingų formų grioveliai. Programa SUPREM modeliuojamas oksidacijos procesas, esant išėsdinto griovelio formai, pateiktai 4 paveiksle.



4 pav. Epitaksiniam Si sluoksnyje išėsdintas griovelis (2 pav. punktyrine linija apibrėžta griovelio dalis)

Oksidacijos proceso metu per jau susidariusį SiO_2 sluoksnį oksidantai skverbiasi gilyn, iki pat Si paviršiaus. Taip susidaro naujas SiO_2 sluoksnis. Jis pakelia jau anksčiau susidariusi oksido sluoksnį kartu su Si_3N_4 . Taip atsiranda įtempimai visoje struktūroje. 5 pav. rodyklėmis pavaizduotos silicio oksido augimo kryptys. Matyti, kad oksido sluoksnis plečiasi ne tik i viršų, bet ir į šonus. Dėl to kai kuriose vietose SiO_2 yra tankesnis ir pro jį prasiskverbia vis mažiau deguonies molekulių. Tose vietose oksido augimo greitis yra mažesnis ir sluoksnyje atsiranda įdubimų. Augantis oksidas plečiasi į Si šonus ir į

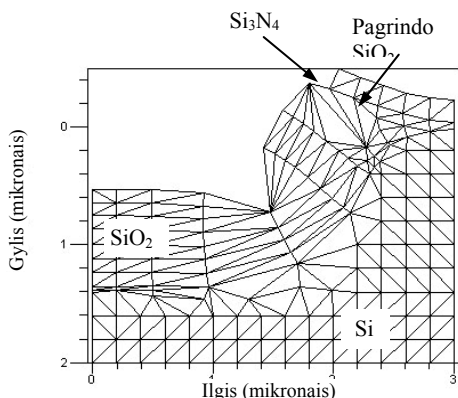
gylį, todėl įtempimų atsiranda ir pačiame Si. Dėl jų gali išsiskraipyti jau suformuotos difuzinės sritys. Tai sukelia formuojamų integrinių elementų elektrinių parametru nuokrypius.



5 pav. Po 100 min susidaręs SiO₂ sluoksnis; oksidacijos proceso temperatūra 1000 °C

Dar vienas nepageidaujamas reiškinys - tai oksido palindimas po silicio nitrido sluoksniu. Oksidacijos metu deguonies molekulės palenda po maskuojamuoju Si₃N₄ sluoksniu. Susidarantis SiO₂ pakelia Si₃N₄. Iškilimai padidina Si₃N₄ sluoksnio įtempimus, dėl kurių atsiranda įtrūkimų. Oksidacijos proceso metu pro įtrūkimus gali patekti deguonies. Išsiskraipo izoliacinis LOCOS srities profilis.

Si oksido augimo greitis labai priklauso nuo temperatūros. Reguluojant oksidacijos proceso greitį, galima reguliuoti ir gaunamo LOCOS oksido sluoksnio profilį. Be abejo, oksidacijos reakcijos trukmė – taip pat labai svarbus reiškinys. 6 pav. pateikta Si oksidacijos metu susidariusio oksido sluoksnio profilis, susidaręs pakėlus oksidacijos reakcijos temperatūrą 1100°C. Epitaksiniam Si sluoksnyje išsėdintas griovelis yra tokio pat profilio, kaip parodyta 4 pav.

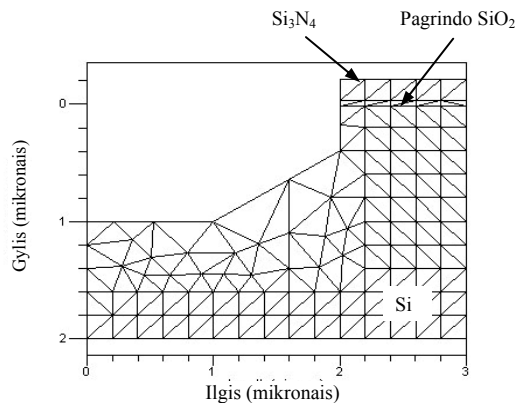


6 pav. Po 100 min susidaręs SiO₂ sluoksnis; oksidacijos proceso temperatūra 1100 °C

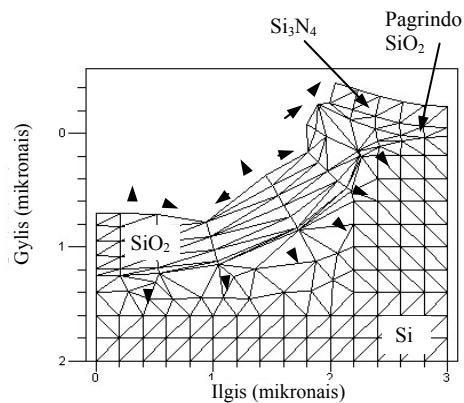
Palyginus 5 ir 6 paveikslus galima įsitikinti, kad, pakėlus oksidacijos proceso temperatūrą iki 1100°C, Si₃N₄ yra labiau pakeltas tose vietose, kur susidarė SiO₂, negu esant oksidacijos proceso temperatūrai 1000°C. Nepriklausomai nuo temperatūros įtempimai išlieka SiO₂

sluoksnyje ir dėl jų SiO₂ storis darosi netolygus. Tai matyti ir 6 paveiksle.

Pakeitus epitaksiniam Si sluoksnyje išsėdinto griovelio konfiguraciją (7 pav.), gerokai pasikeitė ir SiO₂ augimas (8 pav.).



7 pav. Epitaksiniam Si sluoksnyje išsėdintas griovelis



8 pav. Po 100 min susidaręs SiO₂ sluoksnis; oksidacijos proceso temperatūra 1000 °C

Palyginus 5 ir 8 paveikslus matyti, kad esant kitokiai griovelio formai (7 pav.), SiO₂ sluoksnis pradeda augti kiek kitaip (8 pav.). Šiuo atveju įtempimai pasiskirto kitaip ir SiO₂ sluoksnio sutankėjimai gaunami jau dviejose vietose. Dėl skirtingo oksido augimo greičio SiO₂ sluoksnyje susidaro įdubimai, tačiau jų gylis yra mažesnis nei prieš tai pateiktame variante (5 pav.) ir SiO₂ sluoksnio storis yra tolygesnis per visą jo ilgį.

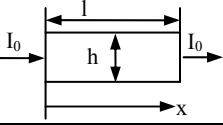
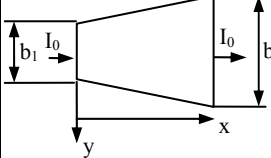
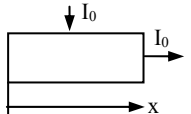
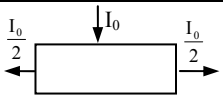
Iš pateiktų matematinio modeliavimo rezultatų matyti, kad oksidacijos procese svarbu kontroliuoti ne tik proceso temperatūrą ir laiką, bet ir prieš tai parinkti reikiamą griovelio formą epitaksiniam Si sluoksnyje, nes dėl to keičiasi SiO₂ augimo specifika.

Si oksidacijos įtaka integrinių elementų elektriniams parametrams

Skaičiuojant integrinių elementų sluoksnių varžas, elementus reikia suskirstyti į atskiras dalis pagal srovės tekėjimo kryptis ir medžiagų kvadrato varžas. Bendra integrinio elemento varža gaunama sudedant atskirų jo dalių varžas.

1 lentelėje pateiktos matematinės išraiškos, pagal kurias galima apskaičiuoti tam tikros formos kūno varžą [1].

1 lentelė. Formulės tam tikros formos kūnų varžoms skaičiuoti

Laidaus kūno forma	Formulė varžai apskaičiuoti
	$r_0 = \frac{\rho l}{bh}$
	$r_0 = \frac{\rho l}{[h(b_2 - b_1)] \ln\left(\frac{b_2}{b_1}\right)}$
	$r_0 = \frac{\rho}{3b\left(\frac{l}{h} + \frac{h}{l}\right)}$
	$r_0 = \frac{\rho}{6b\left(\frac{l}{2h} + \frac{2h}{l}\right)}$

Čia ρ - medžiagos specifinė varža, $\Omega \cdot \mu\text{m}$; h - kūno storis μm .

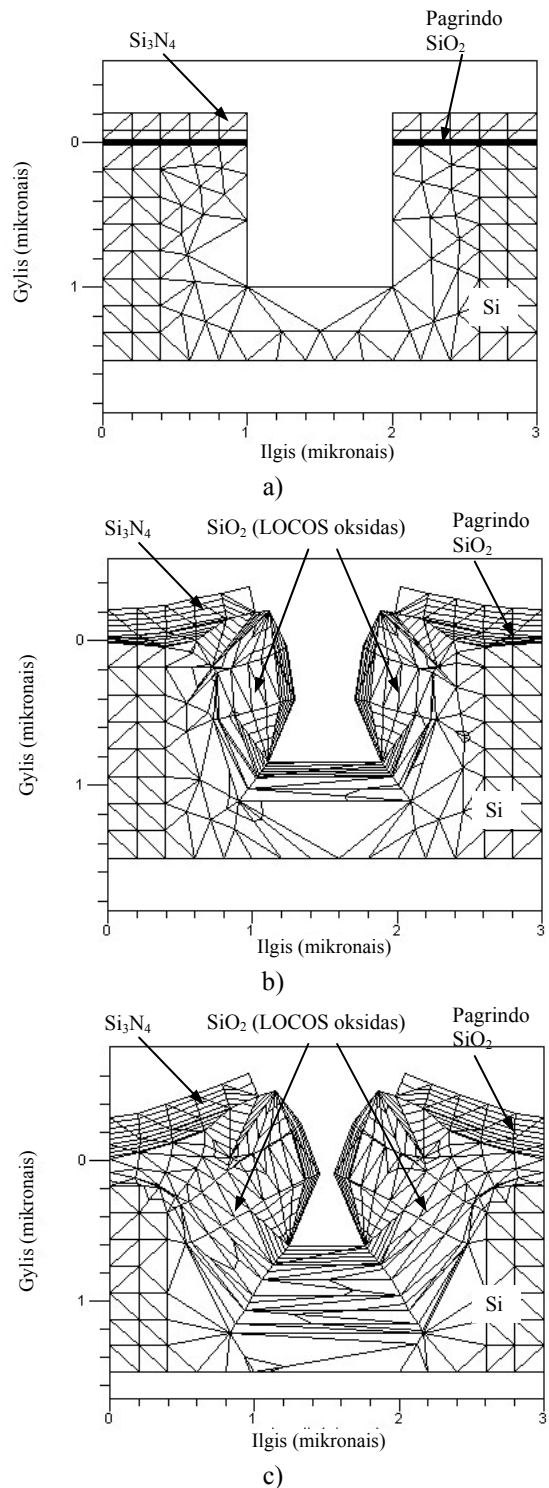
Panagrinėkime, kaip keisis integrinio tranzistoriaus kolektoriaus srities varža, kintant šias sritis skiriančio SiO_2 sluoksnio storiui.

Integrinio tranzistoriaus bazės srities atskyrimas nuo kolektoriaus srities SiO_2 sluoksniu modeliuojamas programa SUPREM. Modeliavimo rezultatai pateikti 9 paveiksle.

Ant užauginto Si sluoksnio formuojamas pagrindo SiO_2 sluoksnis, reikalingas sumažinti Si_3N_4 sluoksnio įtempimams, dėl kurių atsiranda Si_3N_4 sluoksnio defektai. Pagrindo oksido sluoksnis gaunamas 1000°C temperatūroje oksiduojant Si, sausame deguonyje. Reakcijos trukmė 30 min. Oksidacija sausame deguonyje naudojama norint gauti pakankamai ploną ($\sim 0,06\mu\text{m}$), mažiau defektų turinti pagrindo oksido sluoksnį. Ant pagrindo oksido formuojamas Si_3N_4 sluoksnis, kurio storis $\sim 0,18\mu\text{m}$. Silicio nitridas patikimai saugo Si paviršių nuo oksidavimosi, be to, yra lengvai pašalinamas. Paskui Si_3N_4 , SiO_2 , Si sluoksniai išdinimami ir oksiduojami. Šiuo atveju oksidacijos procesas vyksta drėgname deguonyje 1000°C temperatūroje.

Pasinaudoję atliktais modeliavimo rezultatais, apskaičiuojame kolektoriaus srities varžą. Augantis SiO_2 plečiasi į kolektoriaus ir bazės sritis mažindamas jų plotą, o kartu didindamas perėjimo tarp bazės ir kolektoriaus varžą. Kolektoriaus srities varža realiu atveju yra 10 % didesnė negu idealiu atveju, kai oksidas į šonus nesiplečia.

Taip pat svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad augantis SiO_2 gali sudaryti tuštumas (9 pav., c), į kurias kitų technologinių operacijų metu patenka fotorezistas, šėdikliai ir kitos medžiagos. Kad neatsirastų tuštumų, reikėtų susidarymo okside, reikėtų pakeisti užoksiduojamų griovelių formą. Tada pasikeičia SiO_2 augimo specifika.



9 pav. Bazės srities atskyrimo nuo kolektoriaus srities SiO_2 sluoksniu matematinio modeliavimo rezultatai: a - oksidacijos reakcijos pradžia; b - po 1,6 h; c - po 5 h

Išvados

1. LOCOS technologija naudojama siekiant labiau sutankinti elementus integrinėse mikroschemose, tačiau susiduriama su pagrindine problema – Si lokaliaja oksidacija ir Si paviršiaus profilio geometrija.

2. Iš pateiktų matematinio modeliavimo rezultatų matyti, kad oksidacijos procese svarbu optimizuoti ne tik proceso temperatūrą ir laiką, bet ir prieš tai parinkti

reikiamą griovelio formą epitaksiniam Si sluoksnyje, nes dėl to keičiasi SiO₂ augimo profilis. Priimtinausias yra trapecijos formos griovelis.

3. Lokaliajam Si oksidavimui LOCOS technologija yra priimtinausia, kai oksidacija vyksta drėgname deguonyje, esant 1100°C temperatūrai.

4. Augantis SiO₂ plečiasi į gretimas difuzines sritis mažindamas jų plotą. Dėl to kolektoriaus srities varža padidėja apie 10 %, palyginti su idealiu atveju, kai oksidas į šonus nesiplečia.

Literatūra

1. **N. Bagdonavičius, R. Anilionis.** BJT technologijos kokybės tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, ISSN 1392-1215.2002.- Nr. 5(40). – P. 25 – 28.
2. **Stephen A. Campbell.** The Sciences and Engineering of Microelectronic Fabrication. – ISBN 0-19-513605-5. – New York: Oxford University Press, 2001. – P. 68-95, 404-407.
3. SUPREM matematinio modeliavimo programa. Iš Stenfordo Universiteto oficialaus puslapio internete [interaktyvus]. 2004. Prieiga per Internetą: <<http://www-tcad.stanford.edu>>.

Pateikta spaudai 2004 03 01

R. Anilionis, T. Keršys. Lokaliajo oksidavimo technologijos kokybės tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 4(53). – P. 46-50.

Išnagrinėtos LOCOS technologijos problemos, susijusios su lokaliuoju epitaksinio sluoksnio peroksidavimu. Daugiausia problemų kyla dėl oksiduojamo paviršiaus nelygumų. Naudojant programą SUPREM atliktas lokaliajo SiO₂ sluoksnio augimo matematinis modeliavimas. Apskaičiuoti LOCOS oksido profiliai, priklausomai nuo griovelio formos epitaksiniam sluoksnyje, taip pat nuo oksidavimo proceso technologinių režimų: temperatūros ir laiko. Nustatyta, kad priimtinausi rezultatai gaunami, kai griovelis yra trapecijos formos, oksidacija vyksta drėgname deguonyje, esant 1100 °C temperatūrai. Il. 9, bibl. 3 (lietuvių kalba, santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

R. Anilionis, T. Keršys. The Analysis of Quality of Technology of Local Oxidation // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – No. 4(53). – P. 46-50.

Problems of technology LOCOS, related with local oxidation of a epitaxial layer was researched. A lot of problems arise because of an irregularity of an oxidized surface. Using program SUPREM, mathematical modeling of local growth of silicon is carried out. Designed profiles of oxide LOCOS, depending from hole in a epitaxial layer, and also from operating conditions of oxidation: temperature and time. It is determined, that most acceptable results are received when the form of hole is similar to a trapezoid, and oxidation descends in wet oxygen, at 1100 °C. Ill. 9, bibl. 3 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English and Russian).

Р. Анилёнис, Т. Кяршис. Исследование качества технологии локального окисления // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 4(53). С. 46-50.

Исследованы проблемы технологии LOCOS, связанные с локальным окислением эпитаксиального слоя. Множество проблем возникают из-за неровности окисляемой поверхности. Используя программу SUPREM проведено математическое моделирование локального роста SiO₂. Определены наиболее приемлемые режимы технологического процесса локального окисления. Рассчитаны профили оксида LOCOS, принадлежащие от ямки в эпитаксиальном слое, а также от режимов технологического процесса окисления: температуры и времени. Определено, что наиболее приемлемые результаты получаются, когда форма ямки похожа на трапецию, окисление происходит во влажном кислороде при 1100 °C. Ил. 9, библи. 3 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).