

Karimov Ibroximjon Nabiyeovich
Andijon davlat universiteti professori
Foziljonov Mirzabaxrom Baxtiyorjon o'g'li
Andijon davlat universiteti o'qituvchisi
Email: foziljonov.mirzabahrom.1991@gmail.com
Tel: +998999037009

UO'K 537.534

**VERTIKAL MAYDON TRANZISTORI OKSID QATLAMIDA KANAL
BO'YLAB LOKAL ZARYAD JOYLASHGAN SOHA VAZIYATI
O'ZGARISHINI QISQA KANAL EFFEKTLARIGA TA'SIRI**

Annotatsiya: Ko'rilayotgan maqolada izolyator ustida kremniy texnologiyasi asosidagi vertikal izolyatsiyalangan zatvorli maydon tranzistor oksid qatlamida lokal zaryad joylashgan sohaning kanal bo'ylab vaziyati o'zgarishini tranzistorlarda kuzatilishi mumkin bo'lgan qisqa kanalli effektlardan biri bo'lgan SS (bo'sag'adan past o'tish volt-ampere xarakteristikasining qiyaligi (Subthreshold Swing)) effektiga ta'siri ko'rilgan. Nanometer o'lchamlarda tranzistorning geometrik o'lchamlarining fluktuatsiyasi qisqa kanalli effektlarga ta'sir qilishi mumkin. Asosan ko'p zatvorli tranzistorlar qisqa kanal effektlarni kamayishini taminlash maqsadida yaratilgan shu jumladan izolyator ustida kremniy texnologiyasi asosidagi vertikal izolyatsiyalangan zatvorli maydon tranzistorlar ham, ammo o'lchamlari judayam kichiklashganda bu effektlarning paydo bo'lish ehtimolligi ortadi. Ushbu ishda izolyator ustida kremniy texnologiyasi asosidagi vertikal izolyatsiyalangan zatvorli maydon tranzistor oksid qatlamida lokal zaryad joylashgan soha vaziyatining kanal bo'ylab o'zgarishini SS ga ta'siri modellashtirilgan. 3D modellashtirish Advanced TCAD Sentaurus dasturida amalga oshirilgan.

Kalit so'zlar: Advanced TCAD Sentaurus, DIBL, SS effekti, maydon tranzistor, lokal zaryad, ko'p zatvorli tranzistorlar, qisqa kanalli effektlar.

Каримов Иброхим Набиевич
профессор Андижанский государственный университет
Фозилжонов Мирзабахром Бахромжон ўғли
преподаватель Андижанский государственный университет
Email: foziljonov.mirzabahrom.1991@gmail.com
тел: +998999037009

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЛАСТИ ЛОКАЛЬНОГО
ЗАРЯДА В ОКСИДНОМ СЛОЕ ВДОЛЬ КАНАЛА НА ЭФФЕКТЫ
КОРОТКОГО КАНАЛА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛЕВОГО
ТРАНЗИСТОРА**

***Аннотация:** В работе исследуется влияние изменения положения области локализованного заряда в оксидном слое вертикального SOI-полевого транзистора на показатель субпороговой крутизны (Subthreshold Swing, SS), являющийся одним из ключевых эффектов короткого канала. Моделирование выполнено с использованием трёхмерного пакета Advanced TCAD Sentaurus.*

***Ключевые слова:** Advanced TCAD Sentaurus, DIBL, субпороговая крутизна (SS-эффект), полевой транзистор, локальный заряд, многозатворные транзисторы, эффекты короткого канала.*

Karimov Ibroxim Nabievich
professor of Andijan State University,
Foziljonov Mirzabahrom Baxtiyorjon o'g'li
teacher of Andijan State University,
Email: foziljonov.mirzabahrom.1991@gmail.com

**EFFECT OF THE POSITION OF LOCALIZED CHARGE IN THE OXIDE
LAYER ALONG THE CHANNEL ON SHORT-CHANNEL EFFECTS IN A
VERTICAL FIELD-EFFECT TRANSISTOR**

Annotation: *In this work, the influence of the variation in the position of the localized charge region within the oxide layer of a vertical SOI field-effect transistor on the subthreshold swing (SS), which represents one of the key short-channel effects, is investigated. The modeling was carried out using the three-dimensional simulation package Advanced TCAD Sentaurus.*

Key words: *Advanced TCAD Sentaurus, DIBL, subthreshold swing (SS effect), field-effect transistor, localized charge, multi-gate transistors, short-channel effects.*

Kirish

Vertikal maydon tranzistorlar o'lchamlari nanometer masshtabga yetganida uning xarakteristikalarida degradatsiyon effektlar kuzatiladi. Bu effektlarni bartaraf qilish uchun esa avval ularni keltirib chiqargan sabablar, ularning ta'sir mexanizmlari o'rganilishi talab qilinadi. FinFET tranzistorlarida nanoo'lchamlarda uchraydigon asosiy degradatsion effektlarga tranzistor geometrik o'lchamlarining fluktuatsion o'zgarishlari, qisqa kanalli effektlar, zatvor osti oksid qatlamida nuqsonlarning qamralishini kiritishimiz mumkun. Texnologik tomondan bunday o'lchamdagi tranzistorlarni olish qimmat va murakkab ish bo'lganligi uchun dunyoning ko'plab laboratoriyalarida nanoo'lchamdagi maydon tranzistorlarda xosil bo'ladigon effektlar dastlab modellashtirilib o'rganiladi. Bu ishda ham yuqorida aytib o'tilgan effektlarni modellashtirib o'rganilgan. Modellashtirish Advanced TCAD Sentaurus dasturida amalga oshirilgan. Nanoo'lchamdagi maydon tranzistorlarida uchraydigon juda muxum effektlardan biri bo'sag'adan past o'tish volt-amper xarakteristikasining qiyaligi (SS)ning ortishini ko'rsatish mumkun. Odatda bunday qisqa kanal effektini baxolash uchun bo'sag'adan past soxadagi o'tish volt-amper xarakteristikasining tikligiga teskari bo'lgan kattalikka aytiladi va u SS (Subthreshold swing) deb nomlanadi. Narmal ishlaydigon uzun kanalli (1mkm va undan uzun) tranzistorlarda odatda istok va stok orasida potentsiallar farqi xosil qilinganda istokdan stokka oqib o'tadigon tok asosan zatvorga berilgan kuchlanish orqali boshqariladi. Kanal uzunligi nanometr masshtablarga kamaytirilsa zatvor osti oksid qatlamida qamralgan zaryadlar

ta'siri sezila boshlaydi. Qamralgan zaryadlar istok-stok yon o'tish VAXiga ta'sir qiladi bu esa SS ning o'zgarishiga olib keladi. Odatda zatvor osti oksid qatlami SiO₂ ishlatiladi lekin SiO₂ o'rniga hafnium HfO₂ ishlatilishi tranzistorning SS effektini yaxshilashi mumkin [1]. Tranzistor xarakteristikalarini yaxshilash uchun, zatvor osti oksid qatlamini o'zgartirishdan tashqari, zatvorlar sonini xam oshirish mumkin. Biz modellashtirilgan tranzistor uch zatvorli tranzistorlar deb ataladi [2]. Bundan tashqari kanal materialining turi, masalan kremniyli va germaniyli tranzistorlarning qisqa kanal effektlariga ta'siri o'rganilgan. Germaniyli kanalga ega bo'lgan tranzistorlar nisbatan kichikroq SS ni namoyon qilgan [3].

IUK asosidagi FinFET tranzistorlarning kanal kengligini (W_{si}) 6 nm dan 15 nm ga ortishi SS ning 42% ga o'zgarishiga, zatvor uzunligining L_{gate} 12 nm dan 21 nm ga o'zgarishi SSning 14% ga o'zgarishiga olib keladi [4]. Kanal soxasining legirlanish darajasini $1 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ dan $1 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ gacha o'zgartirish orqali bo'sag'a kuchlanishini 30 % ga o'zgartirish mumkin bu esa o'z navbatida nisbatan kichikroq SS qiymatlarini olishni ta'minlaydi [5]. Shu sababli ko'rilayotgan ishda maydon tranzistorining zatvor osti oksid qatlamida yig'ilgan zaryadning stokdan istok tomon zaryadlangan soha vaziyatini o'zgarib borishi (L) ni SS ga ta'siri o'rganilgan.

Adabiyotlar tahlili

Oksid qatlamidagi lokal zaryad joylashgan sohaning stokdan istokga tomon kanal bo'ylab vaziyati o'zgarishi o'tish volt-amper xarakteristikasiga ta'siri modellashtirish natijalari 4-rasmda keltirilgan. Lokal zaryadning istok tomon siljib borish vaziyati istok-stok yon o'tish VAXiga ta'sir qiladi bu esa bizga SS ning qiymatlarini va uning oksid qatlamida qamralgan zaryad ta'sirida o'zgarishini aniqlashimizga imkon beradi. SS kattalik bo'sag'a kuchlanishidan past sohaning tikligiga teskari kattalik bo'lib, quyidagi formula orqali xisoblanadi.

$$SS = \frac{\Delta V_g}{\Delta \lg I_d} = \frac{V_{th} - (V_{th} - 0,2)}{\lg I_{th} - \lg I_{off}} = \frac{0,2}{\lg \left(\frac{I_{th}}{I_{off}} \right)} \quad \left[\frac{\text{мВ}}{\text{декада}} \right] \quad (1)$$

Bu yerda ΔV_g -bo'sag'a kuchlanish V_{th} tranzistor yopiq xolatiga to'g'ri keladigon zatvor kuchlanishi orasidagi farq. Bu maqolada tranzistor yopiq xolatiga mos zatvor kuchlanishi deb bo'sag'a kuchlanishidan 200 mV kichikroq kuchlanish olingan. ΔI_{d} esa bo'sag'a kuchlanishiga to'g'ri keladigon bo'sag'a toki o'nlik logarifmi I_{th} tranzistor yopiq xolatdagi tok logarifmi I_{off} orasidagi farq.

O'tish volt-amper xarakteristikalarining turli soxalarida, masalan bo'sag'a kuchlanishining yuqori soxasida, bo'sag'a kuchlanish atrofida, yoki butun VAX soxasi bo'ylab SS ni xisoblash mumkun. Nanoo'lchamli IUK texnologiyasi asosidagi vertikal o'tishsiz uch zatvorli MOYa tranzistorlari uchun bo'sag'a toki tranzistorning geometrik o'lchamlaridan kelib chiqadi va quyidagi formula orqali aniqlanadi [6].

$$I_{th} = \frac{W_{eff}}{L_g} \cdot 2 \cdot 10^{-7} [A] \quad (2)$$

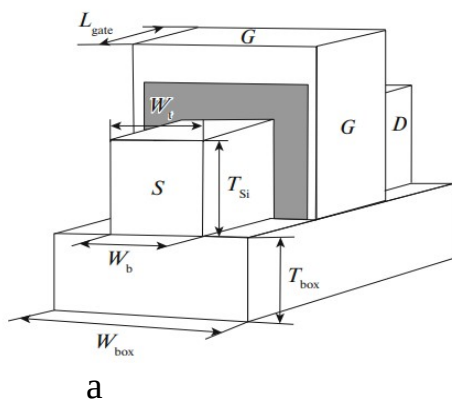
Bu yerda L_g -zatvor uzunligi, W_{eff} -tranzistor uzunligining effektiv kengligi bo'lib biz modellashtirgan tranzistorlarda quyidagicha aniqlanadi.

$$W_{eff} = 2 \cdot T_{si} + W_t \quad (3)$$

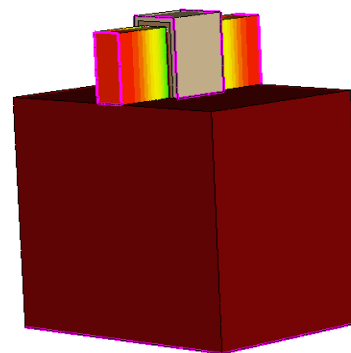
T_{si} -tranzistor kanal qatlamining qalinligi, W_t -tranzistor yuqori qismining kengligi.

FinFET tranzistorining geometrik o'lchamlari $T_{si}=30$ nm, $W_t=12$ nm, $L_g=25$ nm ga teng. (2) va (3) ifodalardan foydalanib FinFET tranzistori uchun bo'sag'a tokining qiymatini keltirib chiqaramiz. Biz modellashtirgan tranzistorda bo'sag'a toki $I_{th}=5,76 \cdot 10^{-7}$ A ga teng. MOYa tranzistor o'tish volt-amper xarakteristikalarining sifati ochiq I_{on} va yopiq I_{ff} stok toklarining nisbati orqali aniqlanadi. FinFET tranzistorlarida yopiq stok toki bo'sag'a kuchlanishidan 200 mV ga kam bo'lgan zatvor kuchlanishga mos kelgan stok toki va ochiq stok toki sifatida esa bo'sag'a kuchlanishidan 200 mV ga kattaroq zatvor kuchlanishiga mos kelgan stok toki olinadi.

Tadqiqot metodologiyasi



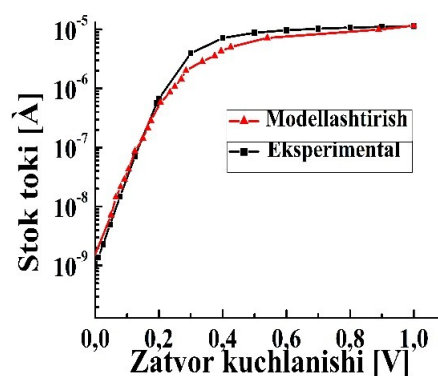
1.a-rasm. Vertikal maydon tranzistorning geometrik tuzilishi



1.b-rasm. Vertikal maydon tranzistorning 3D ko'rinishi

Modellashtirilayotgan tranzistorning zatvor ostidagi oksid qatlamida to'plangan lokal zaryad joylashgan soha vaziyati stokdan istok tomon o'zgarib borishi (L) ni SS ga ta'sirini o'rganishda zaryad joylashgan soha vaziyatining turli L qiymatlari mos ravishda 2,6 nm, 7,4 nm, 12,4 nm, 17,4 nm va 22,4 nmga teng deb olingan. Biz modellashtirgan tranzistorda sirtiy nuqsonlar zichligi 10^{12} cm^{-2} qilib olingan va uni xajm miqdorida xisoblaydigan bo'lsak, model-lashtirishdagi tranzistorning oksid qatlami qalinligi $t_{\text{ox}} = 2,5 \text{ nm}$ ekanligidan kelib chiqib xajmiy zaryad zichligi $4 \cdot 10^{18} \text{ C/sm}^3$ ga teng deb olingan. 1.a-rasmda modellashtirilgan, izolyator ustida kremniy (IUK) texnologiyasi asosidagi FinFET geometrik ko'rinishi va 1.b-rasmda 3D strukturasi, 2-rasmda esa tajriba natijalari va modellashtirishda olingan natijalar taqqoslangan va model kalibrofka qilingan.

Kalibrovkalash jarayonida tok tashuvchilarning harakatchanligi uchun termodinamik va drift-diffuziya transport modellari hamda modellashtirilayotgan

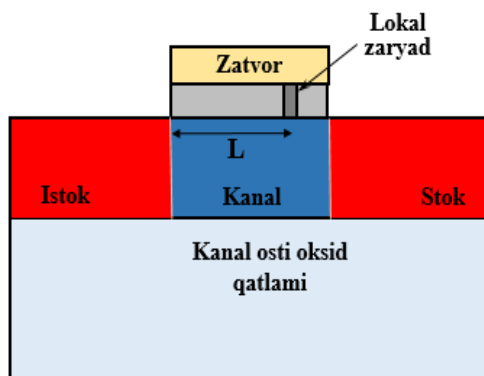


2-rasm. Modellashtirilayotgan vertikal maydon tranzistorning o'tish volt-ampere xarakteristikasi.
 $L_{\text{gate}} = 25 \text{ nm}$ va $V_{\text{gate}} = 750 \text{ mV}$.
 Bo'lgan holat uchun (1) modellashtirishda, (2) tajribada olingan natija.

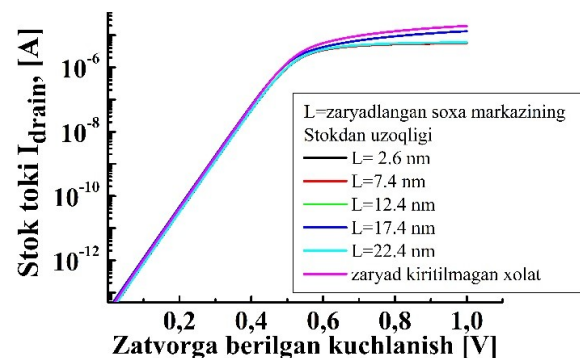
tranzistor nanometer masshtabda bo'lganligi uchun kvant effektlarni e'tiborga olib Quantum Potential korrektirovka qo'llanildi. 3-rasmda FinFET strukturasi kanal bo'ylab kesimi ko'rinishi zaryadlangan sohaning istokgacha vaziyati L ko'rsatilgan. Tranzistor zatvor uzunligi L_{gate} 25 nm va zatvor osti oksid qatlami qalinligi 2.5 nm ni tashkil qiladi. Kanal qalinligi T_{Si} va orqa oksid qatlami qalinligi T_{box} mos ravishda 30 va 100 nm ga teng. Kanal kengligi 12 nm. p-Si taglik (baza) legirlanish darajasi $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Tahlillar va natijalar

Modellashtirish orqali olingan natijalardan foydalanib lokal zaryad istok tomon siljib borish vaziyatini bo'sag'adan past o'tish xarakteristikasi qiyaligi (SS) ga ta'siri o'rganildi. 4-rasmda lokal zaryad joylashgan soha vaziyati o'zgarishi holatlaridagi olingan VAX natijalari keltirilgan bo'lib, ushbu natijalardan lokal zaryad joylashgan soha vaziyati o'zgarishining SS ga ta'siri aniqlandi. 5-rasmda SS ning zaryad joylashgan soha vaziyatiga bog'liq holda o'zgarishi natijalari keltirilgan.

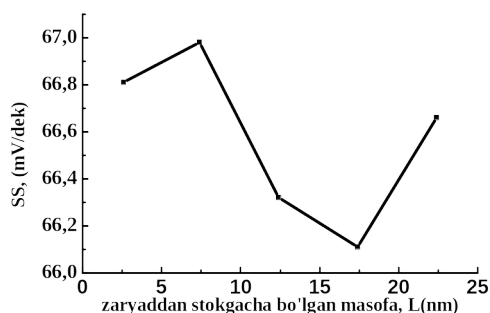


3-rasm. Izolyator ustida kremniy texnologiyasi asosidagi FinFET 3D strukturasi kanal bo'ylab kesimi ko'rinishi.

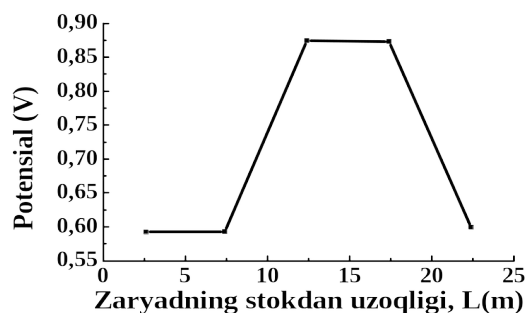


4-rasm. Zaryadlangan lokal sohaning istok-kanal chegarasigacha bo'lgan vaziyatini o'tish VAX siga ta'siri.

Ma'lumki bo'sag'adan past o'tish xarakteristikasi qiyaligi (SS) kanaldagi potensial taqsimoti bilan bog'liq. Shu sababli zatvor osti oksid qatlamida to'plangan zaryadning istok tomon siljib borish vaziyati tufayli potensial taqsimotining o'zgarishi qisqa kanalli effektlarning o'zgarishiga jumladan SS ning



5-rasm. Lokal zaryadning istok tomon siljib borish vaziyati L ni SS ga ta'siri.



6-rasm. Lokal zaryadning istok tomon siljib borish vaziyati L ni potensial taqsimotiga ta'siri.

xam o'zgarishiga olib keladi. Xaqiqatdan ham modellashtirish natijalari shuni ko'rsatadiki lokal zaryad istok tomon siljib borish vaziyati L o'zgarishi bilan potensial taqsimoti ham o'zgaradi. 6-rasmida potensial taqsimotning lokal zaryad joylashgan soha vaziyati istok tomon o'zgarishi L ga bog'lanishi keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki lokal zaryadning istok tomon siljib borish masofasi L ning 17,4 nm qiymatida potensial taqsimoti eng yuqori qiymatga erishgan. Bundan shuni xulosa qilishimiz mumkunki lokal zaryadning istok tomon siljib borish masofasi $L=17,4$ nm bo'lganda SS kichik qiymatlarga erishadi.

Xulosa

Vertikal maydon tranzistorida SS (subthreshold swing)ning qiymati zaryad joylashgan sohaning stokdan istok tomon vaziyati o'zgarishiga bog'liqligi modellashtirish orqali tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, SS qiymati zaryad stokga yaqin joylashganda nisbatan yuqori bo'lishligi, istok tomon siljib borishi bilan kamayishi, va ma'lum bir qiymatda ($L \approx 17,4$ nm) minimal darajaga yetishi va undan keyin yana ortishi aniqlandi. Ushbu hodisa kanal bo'ylab elektrostatik potensial taqsimotining notekisligi hamda stok tomonida elektrostatik maydonning ta'sir kuchi bilan izohlanadi.

Zaryad stok sohasiga yaqin joylashganida stokning teskari yo'nalishdagi elektr maydoni kanal potensialini o'zgartiradi, natijada to'siq balandligi pasayadi va tranzistorning yopilish qobiliyati yomonlashadi. Shu sababli SS ortadi. Zaryad kanalning o'rta qismida joylashganda esa stok tomonidagi elektrostatik maydonning ta'siri kamayadi, zatvor tomonidan elektrostatik boshqaruv kuchayadi

va SS minimal qiymatga ega bo'ladi. Biroq zaryad zatvor o'rtasida joylashganda, oksid–yarimo'tkazgich chegarasida kanal bo'ylab elektrostatik potensialning bir tekis taqsimoti buziladi, va bu tranzistor kanali yopiq bo'lgan holatda ham kanal orqali oqib o'tadigan juda kichik tok oqimining ortishiga olib keladi. Shunday qilib, SS qiymatining zaryad joylashgan soha vaziyati nisbatan chiziqli bo'lmagan o'zgarishi Vertikal maydon tranzistorlarida lokal zaryadlarning kanal bo'ylab taqsimlanishiga sezgir ekanini ko'rsatadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1] Nobrega, R.; Fonseca, Y.; A Costa, R.; Duarte, U. Comparative Study on the Performance of Silicon and III-V Nanowire Gate-All-Around Field-Effect Transistors for Different Gate Oxides. // In Proceedings of the XIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, São Bernardo do Campo, Brazil, 19–20 April 2018.
- [2] Pratap, Y.; Gautam, R.; Haldar, S.; Gupta, R.; Gupta, M. Physics-based drain current modeling of gate-all-around junctionless nanowire twin-gate transistor (JN-TGT) for digital applications. // J. Comput. Electron. **2016**, 15, 492–501.
- [3] Kumar, P.; Singh, S.; Singh, N.P.; Modi, B.; Gupta, N. Germanium v/s silicon Gate-all-around junctionless nanowire transistor. // In Proceedings of the 2014 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), Combiatore, India, 6–8 March 2014; pp. 1–5.
- [4] Bharti, S.; Saini, G. Sensitivity Analysis of Junctionless FinFET for Analog Applications. // In Proceedings of the 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 14–15 June 2018; pp. 1288–1293.
- [5] Han, M.H.; Chang, C.Y.; Chen, H.B.; Cheng, Y.C.; Wu, Y.C. Device and circuit performance estimation of junctionless bulk FinFETs. IEEE Trans. // Electron. Devices **2013**, 60, 1807–1813.
- [6] Barraud S., Berthomé M., Coquand R., Cassé M., Ernst T., Samson M.P., Perreau P., Bourdelle K. K., Faynot O. and Poiroux T. Scaling of Trigate

Junctionless Nanowire MOSFET with Gate Length Down to 13 nm // 2012. IEEE Electron Device Letters. vol. 33. no. 9. pp.1225-1227.