

ZAMONAVIY YARIMO‘TKAZGICH ELEKTRON ASBOBLAR: SI, SiC VA GAN ASOSIDAGI DIOD VA TRANZISTORLARNING QIYOSIY TAHLILI

Uzakov Orif Hamroyevich

Buxoro davlat universiteti “Muhandislik texnologiyalari va qayta tiklanuvchi energiya manbalari” kafedrasi dotsenti

Annotatsiya: Maqolada zamonaviy elektron asboblarning rivojlanishida kremniy (Si), kremniy karbidi (SiC) va galliy nitridi (GaN) yarimo‘tkazgich materiallarining o‘rni qiyosiy tahlil qilinadi. Diod, bipolyar tranzistor, MOSFET, IGBT, SiC MOSFET va GaN HEMT asboblarning ishlash prinsipi, o‘tkazuvchanlik va kommutatsiya yo‘qotishlari, issiqlik rejimi, ishchi kuchlanish va chastota diapazonlari umumlantirilgan. Keng taqiqlangan zonali yarimo‘tkazgichlarning yuqori kritik elektr maydoni, yuqori harorat va yuqori chastotalarda ishlash imkoniyati quvvat elektronikasida energiya samaradorligini oshirishga xizmat qilishi ko‘rsatilgan. Shu bilan birga, GaN va SiC asboblarda drayver, elektromagnit moslashuv, issiqlikni chiqarish, qadoqlash va ishonchlilik masalalari muhim loyiha cheklovlari sifatida tahlil qilingan. Natijalar elektronika va qayta tiklanuvchi energiya qurilmalarida elektron kalitlarni tanlash uchun amaliy mezonlarni shakllantiradi.

Kalit so‘zlar: yarimo‘tkazgich asboblari, diod, MOSFET, IGBT, SiC, GaN, HEMT, quvvat elektronikasi, kommutatsiya yo‘qotishlari, energiya samaradorligi.

Аннотация: В статье выполнен сравнительный анализ роли кремния (Si), карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN) в развитии современных электронных приборов. Рассмотрены диоды, биполярные транзисторы, MOSFET, IGBT, SiC MOSFET и GaN HEMT, их принципы действия, потери проводимости и переключения, тепловой режим, рабочие напряжения и частоты. Показано, что широкозонные полупроводники благодаря высокой критической напряженности электрического поля и способности работать при повышенных температурах и частотах позволяют повысить эффективность силовой электроники. Одновременно проанализированы ограничения, связанные с драйверами, электромагнитной совместимостью, теплоотводом, корпусированием и надежностью.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, диод, MOSFET, IGBT, SiC, GaN, HEMT, силовая электроника, коммутационные потери.

Abstract: This article compares silicon (Si), silicon carbide (SiC), and gallium nitride (GaN) technologies in modern electronic devices. Diodes, BJTs, MOSFETs, IGBTs, SiC MOSFETs, and GaN HEMTs are analyzed in terms of operating principle, conduction and switching losses, thermal behavior, voltage capability, and switching frequency. Wide-

bandgap semiconductors enable higher critical electric fields, higher-temperature operation, and faster switching, which can improve power-conversion efficiency and power density. Practical constraints related to gate driving, electromagnetic compatibility, thermal management, packaging, and reliability are also discussed. The analysis provides device-selection criteria for power electronic and renewable-energy applications.

Keywords: *semiconductor devices, diode, MOSFET, IGBT, SiC, GaN, HEMT, power electronics, switching loss, energy efficiency.*

KIRISH

Elektron asboblari zamonaviy o‘lchash, avtomatika, energetika, telekommunikatsiya va hisoblash texnikasining asosiy funksional elementlaridir. Yarimo‘tkazgich texnologiyalarining rivojlanishi diod va tranzistorlarning o‘lchamlarini kichraytirish bilangina cheklanmay, ularning kommutatsiya tezligi, ruxsat etilgan kuchlanishi, tok zichligi va harorat barqarorligini ham oshirdi. Uzoq vaqt davomida kremniy asosiy material bo‘lib kelgan bo‘lsa-da, yuqori quvvat va yuqori chastota sohalarida uning fizik chegaralari sezila boshladi.

Keng taqiqlangan zonali SiC va GaN materiallari yuqori kritik elektr maydoni va yuqori haroratga chidamlilik kabi xususiyatlari sababli quvvat elektronikasi uchun muhim alternativaga aylandi. 2024-yilgi Power Electronics Handbook sharhida SiC va GaN asboblarning yuqori kuchlanish va yuqori chastota rejimlaridagi ustunliklari qayd etilgan. Zamonaviy sharhlar esa ularning elektr transporti, qayta tiklanuvchi energiya, maishiy va sanoat konvertorlarida qo‘llanishi kengayayotganini ko‘rsatadi.

Maqolaning maqsadi — asosiy yarimo‘tkazgich elektron asboblarning fizik ishlash prinsiplarini umumlashtirish, Si, SiC va GaN texnologiyalarini qiyoslash hamda amaliy elektron tizim uchun mos asbobni tanlash mezonlarini shakllantirish.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Tadqiqot qiyosiy adabiyotlar tahliliga asoslangan. 2022–2026-yillardagi SiC va GaN quvvat asboblari o‘id sharhlar, shuningdek yarimo‘tkazgich elektronikasi bo‘yicha tayanch o‘quv manbalari ko‘rib chiqildi. Qiyoslash mezonlari sifatida taqiqlangan zona kengligi, kritik elektr maydoni, issiqlik o‘tkazuvchanlik, ruxsat etilgan ishchi kuchlanish, kommutatsiya tezligi, o‘tkazuvchanlik yo‘qotishlari, drayver talablari va amaliy qo‘llanish sohasi qabul qilindi.

1. ASOSIY ELEKTRON ASBOBLARNING ISHLASH PRINSIPI

p–n o‘tishli diod tokni asosan bir yo‘nalishda o‘tkazuvchi ikki qutbli elektron asbobdir. To‘g‘ri kuchlanishda potensial to‘siq kamayadi va tok tez ortadi; teskari kuchlanishda esa kichik teskari tok kuzatiladi. Ideal bo‘lmagan real diodlar uchun tok–kuchlanish bog‘lanishi Shockley tenglamasi bilan tavsiflanadi:

$$I = I_s [\exp(qV_D/nkT) - 1] \quad (1)$$

Bipolyar tranzistorlarda kollektor toki baza toki orqali boshqariladi. MOSFETda esa boshqaruv elektrodiga berilgan kuchlanish kanal o‘tkazuvchanligini o‘zgartiradi. Quvvat MOSFETlari yuqori kommutatsiya chastotalari uchun, IGBT esa odatda yuqoriroq kuchlanish va quvvatlarda nisbatan pastroq kommutatsiya chastotalari uchun qo‘llanadi.

Elektron kalitning o‘tkazuvchanlikdagi asosiy yo‘qotishi soddalashtirilgan holda tok va ochiq holat qarshiligiga bog‘liq:

$$P_{\text{cond}} \approx I_{\text{RMS}}^2 R_{\text{on}} \quad (2)$$

Kommutatsiya yo‘qotishlari esa kuchlanish va tokning o‘tish jarayonlarida bir vaqtda mavjud bo‘lishi bilan yuzaga keladi. Kommutatsiya chastotasi ortganda ushbu yo‘qotishlar ham ortadi; shu sababli tez asbobning afzalligi faqat kichik o‘tish vaqtlarida to‘liq namoyon bo‘ladi.

2. Si, SiC VA GaN MATERIALLARINING QIYOSI

Material	Taqiqlangan zona	Asosiy afzallik	Asosiy cheklov
Si	$\approx 1,12 \text{ eV}$	Yetuk texnologiya, arzon, keng nomenklatura	Yuqori kuchlanish/chastotada fizik cheklovlar
4H-SiC	$\approx 3,26 \text{ eV}$	Yuqori kritik maydon, yuqori harorat, yaxshi issiqlik o‘tkazuvchanlik	Narx, gate-oksid va packaging masalalari
GaN	$\approx 3,4 \text{ eV}$	Juda tez kommutatsiya, past zaryadlar, yuqori quvvat zichligi	Parazit induktivlik, dinamik R_{on} va issiqlik boshqaruvi

Manba: zamonaviy WBG sharhlari asosida muallif tomonidan umumlashtirilgan.

SiC asboblari yuqori kuchlanishli konvertorlar va issiqlik rejimi og‘ir bo‘lgan tizimlarda ayniqsa qulay. GaN HEMTlar esa kichik parazit sig‘im va zaryadlari sababli yuqori chastotali, ixcham quvvat manbalari uchun kuchli imkoniyat beradi. Biroq kommutatsiya frontlarining keskinligi PCB topologiyasi, gate loop va EMI talablarini qat‘iylashtiradi.

3. QUVVAT ELEKTRONIKASIDA ASBOB TANLASH

Ish rejimi	Mos asbob	Tanlash sababi
Past kuchlanish, yuqori chastota	Si MOSFET yoki GaN HEMT	Kichik switching loss va ixcham passivlar
400–650 V, yuqori chastota	GaN HEMT / SiC MOSFET	Yuqori samaradorlik va quvvat zichligi

650–1700 V	SiC MOSFET	Kuchlanish, harorat va switching bo'yicha muvozanat
Yuqori quvvat, nisbatan past chastota	IGBT yoki SiC MOSFET	Narx va yo'qotishlar bo'yicha tizimiy tanlov

Asbob tanlashda faqat katalogdagi maksimal kuchlanish yoki tok yetarli emas. Gate drayver, dead-time, dV/dt , di/dt , issiqlik qarshiligi, sovitish usuli, kommutatsiya energiyasi va korpus parazitlari birgalikda hisobga olinishi kerak. Yuqori tezlikdagi GaN yoki SiC asbobini noto'g'ri layout bilan qo'llash kutilgan samaradorlikni bermasligi mumkin.

4. QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA TIZIMLARIDAGI AHAMIYATI

Fotoelektr invertorlar, energiya saqlash konvertorlari va elektr yuritmalarda har bir foiz samaradorlikning amaliy ahamiyati katta. WBG asboblari switching chastotasini oshirish orqali induktor, transformator va filtr o'lchamlarini kamaytirishi, tizim quvvat zichligini oshirishi mumkin. SiC yuqori kuchlanishli DC shinalar va uch fazali invertorlarda, GaN esa past va o'rta quvvatli yuqori chastotali DC–DC bosqichlarda samarali ishlatilmoqda.

Shu bilan birga, WBG qurilmalarda issiqlik tarqalishi chip maydonining kichrayishi sababli mahalliy issiqlik oqimini oshiradi. Demak, materialning yuqori termik imkoniyati yaxshi korpuslash va issiqlik interfeysi bilan birga qo'llanmasa, uning amaliy afzalligi cheklanadi.

5. ISHONCHLILIK VA LOYIHALASH MASALALARI

SiC MOSFETlar uchun gate oksidi, threshold kuchlanish barqarorligi va uzoq muddatli termik sikllar muhim. GaN HEMTlarda dinamik ochiq holat qarshiligi, gate boshqaruvining tor kuchlanish oralig'i va yuqori dV/dt sharoitidagi parazit bog'lanishlar e'tibor talab qiladi. Zamonaviy packaging tadqiqotlari elektr va termik parazitlarni kamaytirish, die-attach va issiqlik tarqatgichlarni takomillashtirishga qaratilgan.

Loyihalashda ikki daraja ajratilishi lozim: birinchisi — yarimo'tkazgich kristalining fizik imkoniyatlari; ikkinchisi — real modul, drayver, PCB va sovitish tizimi bilan olinadigan tizim darajasidagi natija. Energiya samaradorligi ikkinchi darajada baholangandagina amaliy xulosa to'liq bo'ladi.

XULOSA

Si asosidagi diod va tranzistorlar narx, ishlab chiqarish yetukligi va nomenklatura bo'yicha hanuz asosiy o'rinni egallaydi. Biroq yuqori kuchlanish, yuqori harorat va yuqori kommutatsiya chastotasi talab qilinadigan tizimlarda SiC va GaN asboblari muhim texnik ustunlik beradi.

SiC MOSFETlar yuqori kuchlanishli va og'ir termik rejimli qurilmalar uchun, GaN HEMTlar esa yuqori chastotali va ixcham konvertorlar uchun ayniqsa istiqbolli. Asbob tanlash material xossalarigagina emas, drayver, korpus, EMI va issiqlik boshqaruviga ham bog'liq.

Qayta tiklanuvchi energiya qurilmalarida WBG texnologiyalaridan foydalanish konvertor samaradorligi va quvvat zichligini oshirish imkonini beradi. Kelgusidagi tadqiqotlarda asbob–drayver–qadoqlash–sovitish zanjirini yagona tizim sifatida optimallashtirish maqsadga muvofiq.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Gachovska T.K., Hudgins J.L. SiC and GaN Power Semiconductor Devices. In: Power Electronics Handbook. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2024, pp. 87–150. DOI: 10.1016/B978-0-323-99216-9.00039-1.
2. Viewegh N., Holloway H., Biggerstaff R., Herzog J.B. Wide Bandgap Semiconductors for Power Electronics: Comparative Properties, Applications, and Reliability of GaN and SiC Devices. Applied Microelectronics, 2026, 4(1), 6.
3. Rafin S.M.S.H. et al. Power Electronics Revolutionized: A Comprehensive Analysis of Emerging Wide and Ultrawide Bandgap Devices. Micromachines. 2023, 14(11), 2045. DOI: 10.3390/mi14112045.
4. Zhang Y. et al. Wide Band Gap Devices and Their Application in Power Electronics. Energies. 2022, 15(23), 9172.
5. Musumeci S., Barba V. Gallium Nitride Power Devices in Power Electronics Applications: State of Art and Perspectives. Energies. 2023, 16(9), 3894.
6. Kimoto T., Cooper J.A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Wiley-IEEE Press, 2014.
7. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. 2nd ed. Springer, 2019.
8. Razavi B. Fundamentals of Microelectronics. 3rd ed. Wiley, 2021.