

METALL-2D YARIMO'TKAZGICH KONTAKTLARIDA KONTAKT QARSHILIGINI KAMAYTIRISHNING ZAMONAVIY USULLARI

G.S. Berdimuratova

Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universiteti Fizika kafedrası assistenti.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23304149>

Annotatsiya. Tezisdagi o'tish metallari dixalkogenidlari (MoS_2 , WS_2 , WSe_2) asosidagi tranzistorlarda kontakt qarshiligini (R_c) kamaytirishning zamonaviy yondashuvlari — yarimmetall (Bi, Sb), van-der-Waals (vdW) va zonasi gibridlangan kontaktlar, legirlash hamda kontakt chegarasi xossalari optimallashtirish — tahlil qilingan. Monoqatlamli MoS_2 uchun R_c qiymati an'anaviy metallarda ~ 1 k $\Omega \cdot \mu m$ bo'lgan holda, yarimmetall kontaktlarda 42–123 $\Omega \cdot \mu m$ gacha pasayishi ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar: 2D yarimo'tkazgichlar, kontakt qarshiligi, Shottki to'sig'i, Fermi sathining fiksatsiyalanishi, yarimmetall kontakt, vdW kontakt, MoS_2 .

Kirish. Kremniy asosidagi tranzistorlarni o'lchamlari bo'yicha kichiklashtirish fizik chegaralarga yaqinlashmoqda. Bir necha atom qatlamidan iborat ikki o'lchamli (2D) yarimo'tkazgichlar o'tish qalinligini atom darajasigacha kamaytirib, qisqa o'tish effektlarini bostirish imkonini beradi va keyingi avlod mikroelektronikasi uchun istiqbolli material sifatida qaralmoqda [1, 2]. Biroq o'tish uzunligi qisqargan sari tranzistor to'liq qarshiligida kontakt qarshiligining ulushi ortadi va u ishchi tok zichligi hamda tezkorlikni cheklovchi asosiy omilga aylanadi [2, 3]. Shu sababli metall-2D yarimo'tkazgich chegarasida R_c ni kamaytirish 2D elektronikaning eng dolzarb muammolaridan biri hisoblanadi.

Kontakt qarshiligining fizik tabiati. R_c ikki asosiy tashkil etuvchi bilan belgilanadi: metall-yarimo'tkazgich chegarasidagi Shottki to'sig'ining balandligi va metall bilan 2D qatlam orasidagi vdW tirqishining tunnel to'sig'i. Shottki-Mott qoidasiga ko'ra to'siq balandligi metallning chiqish ishi bilan boshqarilishi kerak. Amalda esa metall induksiyalagan tirqish holatlari (MIGS) hamda metall cho'ktirilishida hosil bo'ladigan kontakt defektlari tufayli Fermi sathi fiksatsiyalanadi (Fermi level pinning - FLP), natijada metall tanlovining ta'siri keskin cheklanadi [3, 4]. Shuning uchun an'anaviy metall kontaktli monoqatlamli MoS_2 tranzistorlarida R_c taxminan k $\Omega \cdot \mu m$ tartibida qolib kelgan [5, 6], bir qatlamli 2D yarimo'tkazgich uchun nazariy kvant chegarasi esa ~ 30 $\Omega \cdot \mu m$ atrofida baholanadi [7, 8].

1. Yarimmetall kontaktlar. Eng samarali yondashuvlardan biri — oddiy metall o'rniga Fermi sathida holatlar zichligi nolga yaqin bo'lgan yarimmetallardan foydalanish. Bunda MIGS keskin bostiriladi va Fermi sathi yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanlik zonasi tubiga yaqin joylashadi. 2021-yilda Shen va hammualliflar monoqatlamli MoS_2 ga vismut (Bi) kontakt orqali nol Shottki to'sig'i, $R_c = 123$ $\Omega \cdot \mu m$ va 1135 $\mu A/\mu m$ tok zichligiga erishganini ma'lum qildi [5].

2023-yilda surma (Sb) ning (01 $\bar{1}2$) yo'nalishi bilan kuchli vdW o'zaro ta'sir orqali energetik zonalar gibridlanishi hisobiga $R_c = 42$ $\Omega \cdot \mu m$ ga, ya'ni kvant chegarasiga yaqin qiymatga erishildi; kontakt 125 °C da barqarorligini saqlagan [7]. Ab initio kvant transport hisoblari bu natijada orqa zatvor induksiyalagan legerlash muhim rol o'ynashini ko'rsatdi [8].

Bi ning past erish harorati ($\approx 271^\circ\text{C}$) integratsiya jarayonlari uchun cheklov bo'lgani sababli, Sb kontaktlarining termik barqarorligi alohida o'rganilmoqda [9].

2. p-tipli kontaktlar. n-tipli kontaktlarga nisbatan p-tipli 2D yarimo'tkazgichlar (WSe_2) uchun past qarshilikka erishish qiyinroq bo'lib, bu CMOS sxemalarini yaratishda to'siq bo'lib kelgan. 2025-yilda Nature Nanotechnology jurnalida e'lon qilingan ishda Au elektrod bilan o'zaro ta'sirlashuvchi selen qatlami hisobiga zona gibridlanishi yuz berib, interfeys yarimo'tkazgichdan yarimmetall holatga o'tishi va WSe_2 uchun $R_c = 540\ \Omega\cdot\mu\text{m}$ gacha kamayishi ko'rsatildi; usul qora fosfor va uglerod nanotrubkalarga ham qo'llanishi mumkinligi qayd etilgan [10].

3. vdW va 2D metall kontaktlar. To'g'ridan-to'g'ri metall bug'latish kontakti shikastlab, defekt va noxush FLP hosil qiladi [4]. Oldindan tayyorlangan metall elektrodlarni 2D qatlam ustiga ko'chirish orqali hosil qilinadigan vdW kontaktlar atomar toza kontakti saqlab, MIGS ta'sirini susaytiradi [3]. Kong va hammualliflar tomonidan taklif etilgan, plastina (wafer) miqyosida qo'llanadigan universal vdW kontakt texnologiyasi bu yo'nalishni sanoat darajasiga yaqinlashtiradi [11]. Shuningdek, fazaviy modifikatsiya ($2\text{H} \rightarrow 1\text{T}/1\text{T}'$ metallik faza hosil qilish) va grafen yoki NbS_2 kabi 2D metallardan elektrod sifatida foydalanish ham istiqbolli deb baholanadi [3].

4. Legerlash va kontakt chegarasi xossalarini optimallashtirish. Kontakt sohasini degenerativ darajada legerlash to'siq kengligini kamaytirib, tashuvchilarning tunnellanishini kuchaytiradi. 2024-yildagi hisoblash tadqiqotida mis atomlari qatlamlararo kiritilgan biqatlam MoS_2 uchun kvant chegarasiga yaqin yoki undan past qarshilik taxmin qilingan [12]. Ultra yupqa kontakt qatlamlari va yuzani kimyoviy modifikatsiyalash ham tunnel to'sig'ini kamaytirish vositasi sifatida qaraladi [3].

1-jadval. Metall–2D yarimo'tkazgich kontaktlari uchun R_c ning tipik qiymatlari

Kontakt turi	Tizim	$R_c, \Omega\cdot\mu\text{m}$	Manba
An'anaviy metal (Au, Ti va b.)	monoqatlamli MoS_2	~ 1000	[5, 6]
Yarimmetall Bi	n- MoS_2	123	[5]
Yarimmetall Sb (01^-12)	n- MoS_2	42	[7]
Zonasi gibridlangan Se/Au	p- WSe_2	540	[10]
Nazariy kvant chegarasi	MoS_2	~ 30	[8, 12]

Muammolar va istiqbollar. Birinchidan, past R_c qiymatlari asosan laboratoriya sharoitida, kichik maydonli qurilmalarda olingan; ularni plastina miqyosida takrorlash va CMOS texnologik jarayoniga (harorat, kimyoviy mosligi) moslashtirish hal etilmagan vazifa bo'lib qolmoqda. Ikkinchidan, p-tipli kontaktlar hali n-tipli kontaktlardan ancha ortda. Uchinchidan, R_c ni transfer uzunligi usuli (TLM) orqali aniqlash va tarmoq ichida solishtirish uchun tashuvchilar zichligi, kontakt uzunligi va o'lchash sharoitlarini yagona standartda hisobot qilish zarur [13].

Shuningdek, atomar toza interfeyslarda kontaktning ichki fizikasini aniqlash uchun ultratoza qurilma platformalari ishlab chiqilmoqda.

Xulosa. So'ngi yillardagi tadqiqotlar metall–2D yarimo'tkazgich kontaktlarida R_c ni ~ 1 $k\Omega \cdot \mu m$ dan 42–123 $\Omega \cdot \mu m$ gacha kamaytirish mumkinligini ko'rsatdi. Bunga asosan MIGS ni bostiruvchi yarimmetall (Bi, Sb), zonasi gibridlangan (Se/Au) va vdW kontaktlar, shuningdek, legerlash hamda kontakt chegarasini optimallashtirish orqali erishildi. Keyingi tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlari — p-tipli kontaktlar, termik barqarorlik, plastina miqyosidagi integratsiya va natijalarni standartlashtirilgan solishtirishdir.

Adabiyotlar

1. Liu Y., Duan X., Shin H.-J., Park S., Huang Y., Duan X. Promises and prospects of two-dimensional transistors // *Nature*. 2021. Vol. 591. P. 43–53.
2. Das S. va boshq. Transistors based on two-dimensional materials for future integrated circuits // *Nature Electronics*. 2021. Vol. 4. P. 786–799.
3. Wang Y., Chhowalla M. Making clean electrical contacts on 2D transition metal dichalcogenides // *Nature Reviews Physics*. 2022. Vol. 4. P. 101–112.
4. Schauble K. va boshq. Uncovering the effects of metal contacts on monolayer MoS2 // *ACS Nano*. 2020. Vol. 14. P. 14798–14808.
5. Shen P.-C. va boshq. Ultralow contact resistance between semimetal and monolayer semiconductors // *Nature*. 2021. Vol. 593. P. 211–217.
6. Chou A.-S. va boshq. High on-current 2D nFET of 390 $\mu A/\mu m$ at $V_{DS} = 1$ V using monolayer CVD MoS2 without intentional doping // *Symposium on VLSI Technology*. 2020. Paper TN1.7.
7. Li W. va boshq. Approaching the quantum limit in two-dimensional semiconductor contacts // *Nature*. 2023. Vol. 613. P. 274–279.
8. Lizzit D. va boshq. Reinterpreting low resistance in Sb–MoS2 ohmic contacts by means of ab initio transport simulations // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2024.
9. Chou A.-S. va boshq. Antimony semimetal contact with enhanced thermal stability for high performance 2D electronics // *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2021.
10. Wang C. va boshq. Band-hybridized selenium contact for p-type semiconductors // *Nature Nanotechnology*. 2025. DOI: 10.1038/s41565-025-02084-y.
11. Kong L. va boshq. Wafer-scale and universal van der Waals metal semiconductor contact // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Art. 1014.
12. Wang H., Liu X., Wang H., Wang Y., Yin H. Achieving low contact resistance through copper-intercalated bilayer MoS2 // *arXiv:2412.18385*. 2024.
13. Cheng Z. va boshq. How to report and benchmark emerging field-effect transistors // *Nature Electronics*. 2022. Vol. 5. P. 416–423.