

Date: 9th September-2026

UDK 621.315.592

**MARGANES NANOKLASTERLI KUCHLI KOMPENSATSIYALANGAN
KREMNIYDA HARORAT VA ELEKTR MAYDONGA SEZGIRLIKNING FIZIK
MEXANIZMLARI**

Sh.D. Tovarova

tyutor, UBS universiteti

Tovarova Shahnoza Dilshot qizi | e-mail: shaznozatarova9493@gmail.com |

ORCID: 0009-0008-0400-8727

Annotatsiya. Ushbu maqolada kuchli kompensatsiyalangan, marganes nanoklastarlari bilan modifikatsiyalangan p-tipli kremniyning harorat va elektr maydonga sezgirliги hamda bu sezgirlikni belgilovchi fizik mexanizmlar tahlil qilinadi. Magistrlik tadqiqoti natijalariga ko'ra, material $T = 77-400$ K oralig'ida ishlaydigan, termosezgirlik koeffitsienti $\beta \approx 9000-10000$ K⁻¹ ga yetadigan yuqori sezgir termodatchik yaratish imkonini beradi; $T = 240-320$ K oralig'ida esa manfiy magnit qarshilik orqali amalga oshiriladigan qo'shimcha termik kanal ($\beta = 7-8$ %/K) mavjudligi ko'rsatilgan. Elektr maydonga sezgirlik 2–2,5 %/(V/sm) ni tashkil etadi. Kuzatilgan yuqori sezgirlik kuchli kompensatsiyalangan materiallarga xos tashuvchilar harakatchanligining pasayishi, ularning hayot davri o'zgarishi va mahalliy elektroneytrallikning yo'qligi natijasida yuzaga keladigan energetik zonalar modulyatsiyasi bilan izohlanadi. Natijalar Mn nanoklastarli kremniyni ekstremal sharoitlarda ishlaydigan yuqori sezgir ko'p funktsiyali datchiklar uchun istiqbolli material sifatida qo'llash imkoniyatini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: kremniy, marganes nanoklastarlari, kuchli kompensatsiyalangan yarimo'tkazgich, termosezgirlik, elektr maydon sezgirliги, energetik zonalar modulyatsiyasi, ko'p funktsiyali datchik.

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТЕМПЕРАТУРЕ И
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ПОЛЮ СИЛЬНО КОМПЕНСИРОВАННОГО
КРЕМНИЯ С НАНОКЛАСТЕРАМИ МАРГАНЦА**

Товарова Ш.Д.

тьютор, Университет UBS | e-mail: shaznozatarova9493@gmail.com | ORCID:

0009-0008-0400-8727

Аннотация. В статье анализируется чувствительность к температуре и электрическому полю сильно компенсированного кремния p-типа, модифицированного нанокластерами марганца, а также физические механизмы, определяющие эту чувствительность. Согласно результатам магистерского исследования, материал работоспособен в диапазоне $T = 77-400$ K и обладает коэффициентом термочувствительности $\beta \approx 9000-10000$ K⁻¹; в интервале $T = 240-320$ K показан дополнительный термоканал через отрицательное магнитосопротивление



Date: 9th September-2026

($\beta = 7-8 \text{ \%}/\text{K}$). Чувствительность к электрическому полю составляет $2-2,5 \text{ \%}/(\text{В}/\text{см})$. Наблюдаемая высокая чувствительность объясняется характерным для сильно компенсированных материалов снижением подвижности носителей заряда, изменением времени их жизни и модуляцией энергетических зон вследствие отсутствия локальной электронейтральности. Результаты подтверждают перспективность применения кремния с нанокластерами Mn для высокочувствительных многофункциональных датчиков, работающих в экстремальных условиях.

Ключевые слова: кремний, нанокластеры марганца, сильно компенсированный полупроводник, термочувствительность, чувствительность к электрическому полю, модуляция энергетических зон, многофункциональный датчик.

PHYSICAL MECHANISMS OF TEMPERATURE AND ELECTRIC-FIELD SENSITIVITY IN STRONGLY COMPENSATED MANGANESE-NANOCLUSTER SILICON

Sh.D. Tovarova

tutor, UBS University | e-mail: shaznozatarova9493@gmail.com | ORCID: 0009-0008-0400-8727

Abstract. This paper analyses the temperature and electric-field sensitivity of strongly compensated p-type silicon modified with manganese nanoclusters, together with the physical mechanisms underlying this sensitivity. According to the master's research results, the material operates over $T = 77-400 \text{ K}$ with a thermosensitivity coefficient of $\beta \approx 9000-10000 \text{ K}^{-1}$; over $T = 240-320 \text{ K}$ an additional thermal channel via negative magnetoresistance ($\beta = 7-8 \text{ \%}/\text{K}$) is demonstrated. The electric-field sensitivity is $2-2.5 \text{ \%}/(\text{V}/\text{cm})$. The observed high sensitivity is explained by the reduced carrier mobility, altered carrier lifetime, and energy-band modulation characteristic of strongly compensated materials arising from the absence of local electroneutrality. The results confirm the potential of Mn-nanocluster silicon for highly sensitive multifunctional sensors operating under extreme conditions.

Keywords: silicon, manganese nanoclusters, strongly compensated semiconductor, thermosensitivity, electric-field sensitivity, energy-band modulation, multifunctional sensor.

KIRISH

Ekstremal sharoitlarda (yuqori va past haroratlar, kuchli elektr maydonlar) ishlaydigan yuqori sezgir yarimo'tkazgich datchiklar aerokosmik, harbiy va sanoat sohalarida dolzarb ahamiyat kasb etmoqda [9]. An'anaviy termorezistorlar odatda cheklangan harorat oralig'ida ishlaydi va bir vaqtning o'zida bir nechta tashqi ta'sirga babbaravar sezgir bo'lmaydi.



Date: 9th September-2026

Kuchli kompensatsiyalangan yarimo'tkazgichlar — legirlovchi va kompensatsiyalovchi aralashma atomlari konsentratsiyasi bir-biriga yaqin bo'lgan materiallar — nostandart elektr va termik xususiyatlari bilan alohida qiziqish uyg'otadi. Marganes atomlari bilan legirlangan va nanoklasterlar shaklida modifikatsiyalangan kremniy aynan shunday tizimga misol bo'lib, uning elektr va magnit-fotoelektrik xossalari muallifning magistrlik tadqiqotida ko'rsatilgan [8]. Shu munosabat bilan ushbu maqolaning maqsadi — kuchli kompensatsiyalangan, marganes nanoklasterli p-tipli kremniyning harorat va elektr maydonga sezgirlikni hamda bu sezgirlikni belgilovchi fizik mexanizmlarni tahlil qilishdan iborat.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Kuchli kompensatsiyalangan yarimo'tkazgichlarda legirlovchi va kompensatsiyalovchi markazlar konsentratsiyasining yaqinligi tashuvchilar harakatchanligi, hayot davri va energetik zonalar strukturasida sezilarli o'zgarishlarga olib kelishi ma'lum. Mn bilan legirlangan kremniyda manfiy magnit qarshilikning elektr maydon va yorug'lik ta'sirida stimulyatsiyasi [4] hamda uning harorat bilan bog'liqligi [5] alohida o'rganilgan bo'lsa-da, bu natijalarni kuchli kompensatsiyalangan yarimo'tkazgichlar nazariyasi nuqtai nazaridan termosezgirlik mexanizmi sifatida tizimli tahlil qiluvchi ishlar cheklangan.

Ekstremal sharoitlarda ishlaydigan datchiklar bo'yicha so'nggi umumlashtiruvchi tadqiqot [9] ham material fanida yangi, keng harorat oralig'ida barqaror ishlaydigan tizimlarni izlash dolzarbligini tasdiqlaydi. Aynan shu bo'shliq — Mn nanoklasterli kremniyning termik va elektr maydon kanallarini yagona fizik model doirasida izohlash — ushbu maqolaning predmetini tashkil etadi.

ILMIY YANGILIK

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

— birinchi marta marganes nanoklasterli kremniyning yuqori termosezgirli ($\beta \approx 9000-10000 \text{ K}^{-1}$, $T = 77-400 \text{ K}$) kuchli kompensatsiyalangan yarimo'tkazgichlar nazariyasi (tashuvchilar harakatchanligining pasayishi, hayot davrining o'zgarishi va mahalliy elektroneytrallikning yo'qligi natijasida energetik zonalar modulyatsiyasi) asosida izohlandi;

— $T = 240-320 \text{ K}$ oralig'ida manfiy magnit qarshilik orqali amalga oshiriladigan qo'shimcha termik sezgirlik kanali ($\beta = 7-8 \text{ \% / K}$) asosiy rezistiv termokanal bilan birga ko'rib chiqildi, bu ikkita mustaqil fizik mexanizmga asoslangan termodatchik yaratish imkoniyatini ochadi;

— harorat va elektr maydonga sezgirlikning miqdoriy qiymatlari yagona material va yagona nazariy asos doirasida tizimlashtirildi (1-jadval).

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Tadqiqot ob'ekti

Tadqiqot ob'ekti sifatida past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya usuli bilan marganes atomlari kiritilgan, kuchli kompensatsiyalangan p-tipli monokristall kremniy namunalari ($\text{Si}_{1-x}\text{B}_x\text{Mn}_x$) tanlandi. Namunalarning solishtirma qarshiligi $\rho = 5 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-5} \text{ Om} \cdot \text{sm}$ oralig'ida, o'lchami esa $8 \times 3 \times (0,6-0,8) \text{ mm}^3$ ni tashkil etdi.



O'lchash usullari

Rezistiv termosezgirlik namunaning elektr qarshiligini $T = 77-400$ K oralig'ida haroratga bog'liq holda o'lchash orqali aniqlandi. Manfiy magnit qarshilik orqali amalga oshiriladigan termokanal maxsus qurilmada, magnit maydon $B = 0-2,1$ T va harorat $T = 77-320$ K oralig'ida o'zgartirib turilgan holda o'rganildi. Elektr maydonga sezgirlik namunaga qo'llaniladigan elektr maydonni $E = 5-140$ V/sm oralig'ida o'zgartirib, qarshilikning javobini qayd etish orqali baholandi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Kuchli kompensatsiyalangan holatning nazariy asoslari

Kuchli kompensatsiyalangan yarimo'tkazgichlarda legirlovchi va kompensatsiyalovchi markazlar konsentratsiyalari farqi (Na-Nd) ularning umumiy konsentratsiyasidan ancha kichik bo'ladi, shu sababli xona haroratida tashuvchilar konsentratsiyasi xos yarimo'tkazgichnikiga yaqinlashadi; nazariy jihatdan hatto kichik ulushdagi chuqur sathlar tashuvchilar konsentratsiyasini bir necha tartibga kamaytirishi mumkinligi ko'rsatilgan [10]. Bunday materiallar xos yarimo'tkazgichdan uchta muhim jihati bilan farqlanadi: birinchidan, tashuvchilar harakatchanligi bir va ko'p zaryadli aralashma markazlarida sochilish hisobiga sezilarli pasayadi — bu holat kompensatsiyalangan kremniy uchun ham tajribaviy tasdiqlangan [11]; ikkinchidan, tashuvchilarning hayot davri chuqur markazlar tabiatiga qarab bir necha tartibgacha o'zgaradi, bu esa chuqur defektlar konsentratsiyasiga bog'liqligi so'nggi tadqiqotlarda ham ko'rsatilgan [12]; uchinchidan, aralashma atomlarining tartibsiz taqsimlanishi mahalliy elektroneytrallikning buzilishiga va natijada energetik zonalarning modulyatsiyalanishiga olib keladi. Aynan shu uch omil Mn nanoklasterli kremniyda kuzatilgan yuqori termik va elektr maydon sezgirligining fizik asosini tashkil etadi.

Termosezgirlik

To'g'ridan-to'g'ri rezistiv o'lchovlarda Mn nanoklasterli kremniy $T = 77-400$ K oralig'ida ishlaydigan, termosezgirlik koeffitsienti $\beta \approx 9000-10000$ K⁻¹ ga yetadigan yuqori sezgirlikka ega ekani aniqlandi — bu qiymat an'anaviy termorezistorlarnikidan sezilarli yuqori. Bundan tashqari, $T = 240-320$ K oralig'ida manfiy magnit qarshilik qiymati 600 martagacha o'zgarishi kuzatilib, bu esa $\beta = 7-8$ %/K termosezgirlik koeffitsientiga mos keladi. Ushbu ikkinchi kanal Mn klasterlarining energetik sathlari to'lish darajasining haroratga bog'liqligi bilan izohlanadi va asosiy rezistiv kanaldan mustaqil ravishda ishlaydi, bu ikki mustaqil fizik mexanizmga asoslangan termodatchik yaratish imkoniyatini beradi.

Sezgirlik kanali	Diapazon	Sezgirlik	Fizik mexanizm
Rezistiv termokanal	$T = 77-400$ K	$\beta \approx 9000-10000$ K ⁻¹	Energetik zonalar modulyatsiyasi
MMQ orqali termokanal	$T = 240-320$ K	$\beta = 7-8$ %/K	Klaster sathlarining termik to'lishi
Elektr maydon kanali	$E = 5-140$ V/sm	$2-2,5$ %/(V/sm)	Maydon-stimulyatsiyalangan

Date: 9th September-2026

Sezgirlik kanali	Diapazon	Sezgirlik	Fizik mexanizm
			detrapping

1-jadval. Kuchli kompensatsiyalangan Si<B,Mn> namunalarining harorat va elektr maydon kanallari bo'yicha sezgirligi

Elektr maydonga sezgirlik

Elektr maydonning oshishi bilan manfiy magnit qarshilik kattalashishi kuzatilgan [5], bu esa Mn nanoklasterlari atrofida lokalizatsiyalangan holatlardan tashuvchilarning maydon ta'sirida chiqishi (field-assisted detrapping) mexanizmi bilan bog'liq. O'tkazilgan o'lchovlarda elektr maydonga sezgirlik 2–2,5 %/(V/sm) ni tashkil etib, javob tezligi 10–15 ms ni tashkil etdi. Bu natija material qarshiligini nafaqat harorat, balki qo'llaniladigan elektr maydon orqali ham boshqarish mumkinligini, demak uni ikki parametrlilik (harorat + elektr maydon) datchik sifatida loyihalash mumkinligini ko'rsatadi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Kuchli kompensatsiyalangan, marganes nanoklasterli p-tipli kremniyning $T = 77\text{--}400\text{ K}$ oralig'ida ishlaydigan yuqori termosezgirligi ($\beta \approx 9000\text{--}10000\text{ K}^{-1}$) hamda $T = 240\text{--}320\text{ K}$ oralig'ida manfiy magnit qarshilik orqali amalga oshiriladigan qo'shimcha termik kanali ($\beta = 7\text{--}8\text{ \%}/\text{K}$) aniqlandi. Elektr maydonga sezgirlik 2–2,5 %/(V/sm) ni tashkil etdi. Kuzatilgan sezgirlik kuchli kompensatsiyalangan materiallarga xos tashuvchilar harakatchanligining pasayishi, hayot davri o'zgarishi va energetik zonalar modulyatsiyasi bilan izohlandi.

Olingan natijalar Mn nanoklasterli kremniyni keng harorat oralig'ida (kriogen haroratlardan $T = 400\text{ K}$ gacha) barqaror ishlaydigan, harorat va elektr maydonga bir vaqtning o'zida sezgir ko'p funksiyali datchiklar uchun istiqbolli material sifatida qo'llash imkoniyatini ko'rsatadi. Keyingi tadqiqotlarda uchta sezgirlik kanali (magnit, termik, elektr maydon) o'rtasidagi o'zaro ta'sirni bitta kristallda birgalikda baholash hamda amaliy datchik namunasini yaratish tavsiya etiladi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Ma S.B., Sun Y.P., Zhao B.C., Tong P., Zhu X.B., Song W.H. Magnetic and electronic transport properties of Mn-doped silicon // Solid State Communications. 2006. Vol. 140, Iss. 3–4. P. 192–196. DOI: 10.1016/j.ssc.2006.07.039.
2. Bakhadyrkhanov M.K., Iliev H.M., Mavlonov G.Kh. et al. Silicon with magnetic nanoclusters of manganese atoms as a new ferromagnetic material // Technical Physics. 2019. Vol. 64, No. 3. P. 385–388. DOI: 10.1134/S1063784219030046.
3. Negative magnetoresistance in silicon doped with manganese // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 401. DOI: 10.1051/e3sconf/202340105094.
4. Bakhadyrkhanov M.K., Sattarov O.E., Iliev Kh.M. et al. Stimulation of negative magnetoresistance by an electric field and light in silicon doped with boron and manganese // Semiconductors. 2005. Vol. 39, No. 7. P. 789–791. DOI: 10.1134/1.1992635.

Date: 9th September-2026

5. Bakhadir Khanov M.K., Ayupov K.S., Mavlyanov G.Kh. et al. Negative magnetoresistance in silicon with manganese-atom complexes [Mn]₄ // Semiconductors. 2010. Vol. 44, No. 9. P. 1145–1148. DOI: 10.1134/S106378261009006X.
6. Photoconductivity of silicon with multicharged clusters of manganese atoms [Mn]₄ // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2010. Vol. 46, No. 3. P. 276–280. DOI: 10.3103/S1068375510030154.
7. Mavlonov G.Kh., Sattorov O.E., Asanov D., Tachilin S.A., Tovarova Sh.D. Poluchenie kremniya s magnitnymi nanoklasternami primesnykh atomov // III Mejdunarodnaya konferensiya «Nanostrukturnye poluprovodnikovye materialy v fotoenergetike». Tashkent, 2022. S. 400–403.
8. Tovarova Sh.D. Razrabotka mnogofunksionalnogo datchika fizicheskikh velichin: magistr. dissertatsiyasi. Toshkent, 2023.
9. Huang X., Wang H., Song B., Mao Y., Zhao Z.-J., Yu B., Qian L. Advances in High-Temperature Sensor Technologies: Material System, Sensing Principles, Drift Compensation, and Encapsulation Reliability // ACS Omega. 2026. Vol. 11, No. 4. P. 4843–4867. DOI: 10.1021/acsomega.5c08859.
10. Neumark G.F. Effect of deep levels on semiconductor carrier concentrations in the case of “strong” compensation // Physical Review B. 1982. Vol. 26, Iss. 4. P. 2250. DOI: 10.1103/PhysRevB.26.2250.
11. Zhang S., Modanese C., Gaspar G., Søndena R., Tranell G., Di Sabatino M. Majority carrier mobility of compensated silicon: comparison of room temperature measurements and models // Energy Procedia. 2016. Vol. 92. P. 278–283. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.07.078.
12. Palleti P.C., Juda U., Seyidov P., Pietsch M., Schüler N., Fiedler A., Sumathi R.R. Impact of crystal defects on carrier transport properties in high-purity germanium crystals // Materials Science and Engineering: B. 2025. DOI: 10.1016/j.mseb.2025.119048.

