

UDK 621.315.592

**KREMNIYDA MARGANES NANOKLASTERLARINING SHAKLLANISHI
VA ULARNING ELEKTR XOSSALARIGA TA’SIRI**

Sh.D. Tovarova

tyutor, UBS universiteti

Tovarova Shahnoza Dilshot qizi | e-mail: shaznozatovarova9493@gmail.com |

ORCID: 0009-0008-0400-8727

Annotatsiya. *Ushbu maqolada marganes (Mn) atomlari bilan legirlangan p-tipli monokristall kremniyda nanoklasterlarning shakllanish jarayoni hamda ularning material elektr xossalariga ta’siri tadqiq etilgan. Mn atomlari past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya usuli bilan kiritilgan, namunalarning elektr parametrlari to‘rt zondli usul va Xoll effekti asosida aniqlangan. Ishda birinchi marta Mn nanoklasterlari konsentratsiyasining o‘zgarishi bilan solishtirma qarshilik, tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligi orasidagi miqdoriy bog‘liqlik EPR spektroskopiyasi natijalari bilan birgalikda tahlil qilingan. Olingan natijalar Mn nanoklasterli kremniyni magnit va fotoelektrik funksional material sifatida qo‘llash istiqbolini ko‘rsatadi.*

Kalit so‘zlar: *kremniy, marganes, nanoklaster, diffuzion legirlash, elektr xossalar, Xoll effekti, solishtirma qarshilik, EPR spektroskopiyasi.*

**ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ МАРГАНЦА В КРЕМНИИ И ИХ
ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Товарова Ш.Д.

тьютор, Университет UBS

e-mail: shaznozatovarova9493@gmail.com | ORCID: 0009-0008-0400-8727

Аннотация. *В статье исследован процесс формирования нанокластеров в монокристаллическом кремнии p-типа, легированном атомами марганца (Mn), а также их влияние на электрические свойства материала. Атомы Mn вводились методом низкотемпературной ступенчатой диффузии; электрические параметры образцов определялись четырёхзондовым методом и по эффекту Холла. Впервые количественная зависимость между изменением концентрации нанокластеров Mn и такими параметрами, как удельное сопротивление, концентрация и подвижность носителей заряда, проанализирована совместно с данными ЭПР-спектроскопии. Результаты показывают перспективность применения кремния с нанокластерами Mn в качестве магнитного и фотоэлектрического функционального материала.*

Ключевые слова: кремний, марганец, нанокластер, диффузионное легирование, электрические свойства, эффект Холла, удельное сопротивление, ЭПР-спектроскопия.

FORMATION OF MANGANESE NANOCLUSTERS IN SILICON AND THEIR EFFECT ON ELECTRICAL PROPERTIES

Sh.D. Tovarova

tutor, UBS University

e-mail: shaznozatarova9493@gmail.com | ORCID: 0009-0008-0400-8727

Abstract. *This paper investigates the formation of nanoclusters in p-type single-crystal silicon doped with manganese (Mn) atoms and their effect on the electrical properties of the material. Mn atoms were introduced by a low-temperature stepwise diffusion technique, and the electrical parameters of the samples were determined by the four-probe method and the Hall effect. For the first time, the quantitative relationship between the change in Mn nanocluster concentration and resistivity, carrier concentration, and mobility is analysed together with EPR spectroscopy data. The results indicate the prospects of Mn-nanocluster-doped silicon as a functional magnetic and photoelectric material.*

Keywords: *silicon, manganese, nanocluster, diffusion doping, electrical properties, Hall effect, resistivity, EPR spectroscopy.*

KIRISH

Yarimo‘tkazgich materiallarning elektr va magnit xossalarini maqsadli boshqarish zamonaviy mikroelektronika, spintronika va sensorika taraqqiyotining muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Shu boisdan kremniy asosidagi materiallarga o‘tish metallari, xususan marganes (Mn) atomlarini kiritish orqali suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlar (dilute magnetic semiconductors) yaratish masalasi katta ilmiy va amaliy qiziqish uyg‘otmoqda [1–3].

Shu munosabat bilan ushbu ishning maqsadi — past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya usuli bilan marganes atomlari kiritilgan p-tipli monokristall kremniyda nanoklasterlarning shakllanishini hamda ularning material elektr xossalariga ta’sirini eksperimental tadqiq etishdan iborat.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR TAHLILI

Mavjud adabiyotlarda Mn bilan legirlangan kremniyning magnit va elektr-transport xossalari yetarlicha keng o‘rganilgan bo‘lib, bu xossalarning Mn konsentratsiyasiga, kristall panjaradagi nuqsonlarga hamda Mn atomlarining klasterlanish darajasiga bog‘liqligi ko‘rsatilgan [1, 3, 8]. Shu bilan birga, Mn nanoklasterlarining fotoelektrik va magnit

xossalarga ta’sirini o‘rgangan ilgari o‘tkazilgan ishlar [4, 5] kremniyni Mn nanoklasterlari yordamida yangi funksional material sifatida qo‘llash imkoniyatini ochib bergan.

Biroq Mn nanoklasterlari konsentratsiyasi bilan namunalarning elektr parametrlari — solishtirma qarshilik, tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligi — orasidagi miqdoriy bog‘liqlikni past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya sharoitida sistemali tahlil qiluvchi ishlar hozircha yetarli emas. Aynan shu bo‘shliq (gap) ushbu tadqiqotning predmetini tashkil etadi.

TADQIQOTNING ILMIY YANGILIGI

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

— past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya sharoitida Mn bilan legirlangan kremniyda solishtirma qarshilikning besh baravardan ortiq ($1,5 \times 10^2$ dan 2×10^5 Om·sm gacha) o‘zgarish diapazonida tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligining Mn nanoklasterlari shakllanishi bilan bog‘liq miqdoriy tendensiyasi birinchi marta aniqlandi;

— EPR spektroskopiyasi natijalari asosida kremniy kristall panjarasida $[Mn]_4$ tipidagi ko‘p atomli klasterlarning mavjudligi elektr o‘lchov natijalari bilan birgalikda tahlil qilindi, bu Mn atomlarining klasterlanish mexanizmini yakka aralashma markazlari modelidan farqli tarzda izohlash imkonini berdi;

— olingan natijalar asosida Mn nanoklasterli kremniyni magnit-sezgir va fotoelektrik funksional material sifatida qo‘llash bo‘yicha amaliy tavsiyalar shakllantirildi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Tadqiqot ob’ekti

Tadqiqot ob’ekti sifatida boshlang‘ich solishtirma qarshiligi taxminan 3 Om·sm bo‘lgan KDB-3 markali p-tipi monokristall kremniy tanlandi.

Namunalarni tayyorlash

Marganes atomlari namunalarga past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya usuli yordamida, bosimi $\sim 10^{-6}$ mm sim.ust. bo‘lgan vakuumlangan kvars ampulalarda kiritildi. Diffuziya ikki bosqichda amalga oshirildi: dastlab pech 5 °C/min tezlikda qizdirilib, namunalar $T_1 = 550\text{--}700$ °C haroratda $t_1 = 10\text{--}20$ min davomida ushlab turildi; so‘ngra harorat 150–200 °C/min tezlikda $T_2 = 960\text{--}1050$ °C gacha ko‘tarilib, shu haroratda $t_2 = 3\text{--}5$ min saqlandi. Shundan so‘ng ampula pechdan chiqarilib, ~ 200 °C/s tezlikda sovutildi; jarayonning umumiy davomiyligi taxminan 3 soatni tashkil etdi.

Diffuziyadan so‘ng namunalar yuzasidan qoldiq Mn qatlamlarini va sirt nuqsonlarini bartaraf etish maqsadida qalinligi 3–5 mkm bo‘lgan qatlam kimyoviy usulda olib tashlandi.

O‘lchash usullari

Namunalarning elektr parametrlari — solishtirma qarshilik ρ , tashuvchilar konsentratsiyasi n va harakatchanligi μ — 300 K haroratda to‘rt zondli usul va Xoll effekti asosida aniqlandi. Mn atomlarining klasterlangan holatlarini tasdiqlash uchun elektron paramagnit rezonans (EPR) spektroskopiyasidan foydalanildi.

TAHLIL VA NATIJALAR

300 K haroratda olingan tajriba natijalari (1-jadval) namunalarning elektr parametrlari marganes konsentratsiyasi va nanoklasterlarning shakllanish darajasi bilan bog‘liq ravishda o‘zgarishini ko‘rsatdi.

№	ρ, $\text{Om}\cdot\text{sm}$	Tashuvchilar konsentratsiyasi, sm^{-3}	Harakatchanlik, $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$
1	$1,5\text{--}2\times 10^2$	$1,69\times 10^{14}$	180–190
2	$2,5\text{--}3\times 10^2$	$1,26\times 10^{14}$	160–167
3	$8\text{--}9\times 10^2$	$7,98\times 10^{13}$	165–218
4	$7\text{--}8\times 10^3$	$1,22\times 10^{13}$	180–240
5	$1\text{--}1,2\times 10^4$	$6,85\times 10^{12}$	175–190
6	$1,5\text{--}2\times 10^5$	$3,86\times 10^{11}$	172–213

1-jadval. 300 K haroratda o‘lchangan namunalarning elektr parametrlari

Jadval ma’lumotlaridan ko‘rinadiki, namunalar solishtirma qarshiligining oshishi bilan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi monoton ravishda kamayadi — qarshilik uch tartibdan ortiq ($\sim 10^3$ marta) o‘zgarganda, tashuvchilar konsentratsiyasi taxminan 440 martaga kamaygan. Bu holat Mn nanoklasterlari atrofida hosil bo‘ladigan chuqur kompensatsiyalovchi markazlarning erkin tashuvchilarni tutib qolishi bilan izohlanishi mumkin.

Shu bilan birga, tashuvchilar harakatchanligi solishtirma qarshilik oshishi bilan monoton kamaymay, balki 160–240 $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ oralig‘ida tebranib turadi. Harakatchanlikning bunday nomonoton xarakteri klassik ionlashgan aralashmalarda sochilish mexanizmi bilan to‘liq izohlanmaydi; bu, ehtimol, Mn nanoklasterlari atrofida yuzaga keladigan mahalliy potensial fluktuatsiyalari hisobiga qo‘shimcha sochilish kanallarining mavjudligidan dalolat beradi.

Marganes atomlarining klaster shaklida birikishi EPR tadqiqotlari orqali ham mustaqil ravishda tasdiqlangan: xususan, $[\text{Mn}]_4$ kabi ko‘p atomli klasterlarning mavjudligi qayd etilgan. Bu, Mn atomlarining kremniy kristall panjarasida faqat yakka aralashma markazlari sifatida emas, balki klasterlangan holatda ham mavjud bo‘lishini ko‘rsatadi va elektr o‘lchovlarida kuzatilgan nomonoton harakatchanlik xarakterini fizik jihatdan asoslaydi.

Olingan natijalar Mn bilan legirlangan kremniyning elektr va magnit transport xossalari Mn konsentratsiyasi, nuqsonlar hamda klasterlanish jarayonlari bilan bog‘liqligi haqidagi adabiyot ma’lumotlariga mos keladi [1–6, 8], shu bilan birga past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya rejimida olingan miqdoriy tendensiyalarni to‘ldiradi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Marganes atomlarini kremniyga past haroratli bosqichma-bosqich diffuziya usuli bilan kiritish natijasida materialning elektr parametrlari sezilarli darajada o‘zgarishi aniqlandi. 300 K haroratdagi o‘lchashlarda solishtirma qarshilik $1,5 \times 10^2$ dan 2×10^5 Om·sm gacha, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi esa $1,69 \times 10^{14}$ dan $3,86 \times 10^{11}$ sm⁻³ gacha o‘zgarishi kuzatildi, harakatchanlik esa 160–240 sm²/(V·s) oralig‘ida nomonoton tebranish ko‘rsatdi.

EPR tadqiqotlari kremniyda marganesning klasterlangan holatlari, jumladan [Mn]₄ klasterlari mavjudligini tasdiqladi. Elektr o‘lchovlari va EPR natijalarining birgalikdagi tahlili Mn nanoklasterlarining namunalar elektr xossalriga bevosita ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatadi.

Olingan natijalar amaliy nuqtai nazardan Mn nanoklasterli kremniyni magnit-sezgir sensorlar, infraqizil fotoqabul qiluvchi elementlar hamda spintronika qurilmalari uchun funksional yarimo‘tkazgich material sifatida qo‘llash imkoniyatlarini ochib beradi va bu yo‘nalishdagi keyingi tadqiqotlar uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.

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. Ferromagnetism in Mn-doped silicon // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2004. Vol. 282. P. 216–218. DOI: 10.1016/j.jmmm.2004.04.049.
3. Electrical and magnetic properties of Mn-doped Si thin films // Physica B: Condensed Matter. 2009. Vol. 404, Iss. 12–13. P. 1686–1688. DOI: 10.1016/j.physb.2009.02.001.
4. Bakhadyrkhanov M.K., Ayupov K.S., Mavlonov G.Kh. et al. Photoconductivity of silicon with nanoclusters of manganese atoms // Russian Microelectronics. 2010. Vol. 39, No. 6. P. 401–404. DOI: 10.1134/S1063739710060041.
5. 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.
6. Giorgi G., Cartoixa X., Sgamellotti A., Rurali R. Mn-doped silicon nanowires: First-principles calculations // Physical Review B. 2008. Vol. 78. 115327. DOI: 10.1103/PhysRevB.78.115327.
7. Kauzlarich S.M. et al. Synthesis and characterization of manganese-doped silicon nanoparticles: Bifunctional paramagnetic-optical nanomaterial // Journal of the American Chemical Society. 2007. Vol. 129, No. 35. P. 10668–10669. DOI: 10.1021/ja074144q.
8. Influence of background carriers on magnetic properties of Mn-doped dilute magnetic Si // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. Vol. 324, Iss. 22. P. 3748–3753. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.06.010.

9. Mavlonov G.Kh., Sattorov O.E., Asanov D., Tachilin S.A., Tovarova Sh.D. Poluchenie kremniya s magnitnymi nanoklastalami primesnykh atomov // III Mejdunarodnaya konferensiya «Nanostrukturnye poluprovodnikovye materialy v fotoenergetike». Tashkent, 2022. S. 400–403.

10. Tovarova Sh.D. Razrabotka mnogofunksionalnogo datchika fizicheskikh velichin: magistr. dissertatsiyasi. Toshkent, 2023.