ISSN:3030-332X
Impact factor: 9,493
International journal of scientific researchers

GAMNAS YARIMO‘TKAZGICHLARINING ELEKTROFIZIK VA MAGNIT XOSSALARIGA MN KONSENTRATSIYASINING TA’SIRI

To‘xtayev Davron Rustam o‘g‘li
Navoiy viloyati G‘ozg‘on shahar
1-maktabda fizika fani o‘qituvchisi
https://doi.org/10.5281/zenodo.22050835

Annotatsiya. Ushbu maqolada GaMnAs asosidagi suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlarning elektrofizik xossalariga marganes (Mn) qo‘shimchalari konsentratsiyasi va haroratning ta’siri tadqiq etiladi. Tadqiqotda Mn konsentratsiyasining elektr o‘tkazuvchanlik, elektr qarshilik, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va ularning harakatchanligiga ta’siri tahlil qilinadi. Shuningdek, harorat o‘zgarishining GaMnAs materialining elektrofizik hamda magnit xususiyatlariga ta’siri ko‘rib chiqilib, Mn konsentratsiyasi va materialning fizik parametrlari o‘rtasidagi bog‘liqlik aniqlanadi. Olingan ma’lumotlarni tahlil qilish asosida GaMnAs materiallarining xossalarini boshqarish imkoniyatlari va ularning zamonaviy spintronika hamda yarimo‘tkazgich qurilmalarida qo‘llash istiqbollari baholanadi.

Kalit so‘zlar: GaMnAs, GaAs, marganes, Mn konsentratsiyasi, suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgich, elektrofizik xossalar, elektr o‘tkazuvchanlik, zaryad tashuvchilar, magnit xususiyatlar, spintronika.

Kirish

GaMnAs yarimo‘tkazgichlari haqida umumiy ma’lumot

Zamonaviy yarimo‘tkazgich fizikasi va materialshunoslikning muhim yo‘nalishlaridan biri elektr hamda magnit xususiyatlarni bir vaqtning o‘zida namoyon qiluvchi materiallarni tadqiq etish hisoblanadi. Bunday materiallar elektron qurilmalarda nafaqat elektr zaryadini, balki elektronlarning spin holatini ham boshqarish imkonini berishi bilan an’anaviy yarimo‘tkazgichlardan farq qiladi. Shu nuqtayi nazardan, suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlar alohida ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Ushbu materiallar qatorida GaMnAs - galliy arsenid (GaAs) kristall matritsasiga marganes (Mn) atomlari kiritilishi orqali hosil qilinadigan material - keng o‘rganilgan tizimlardan biridir.

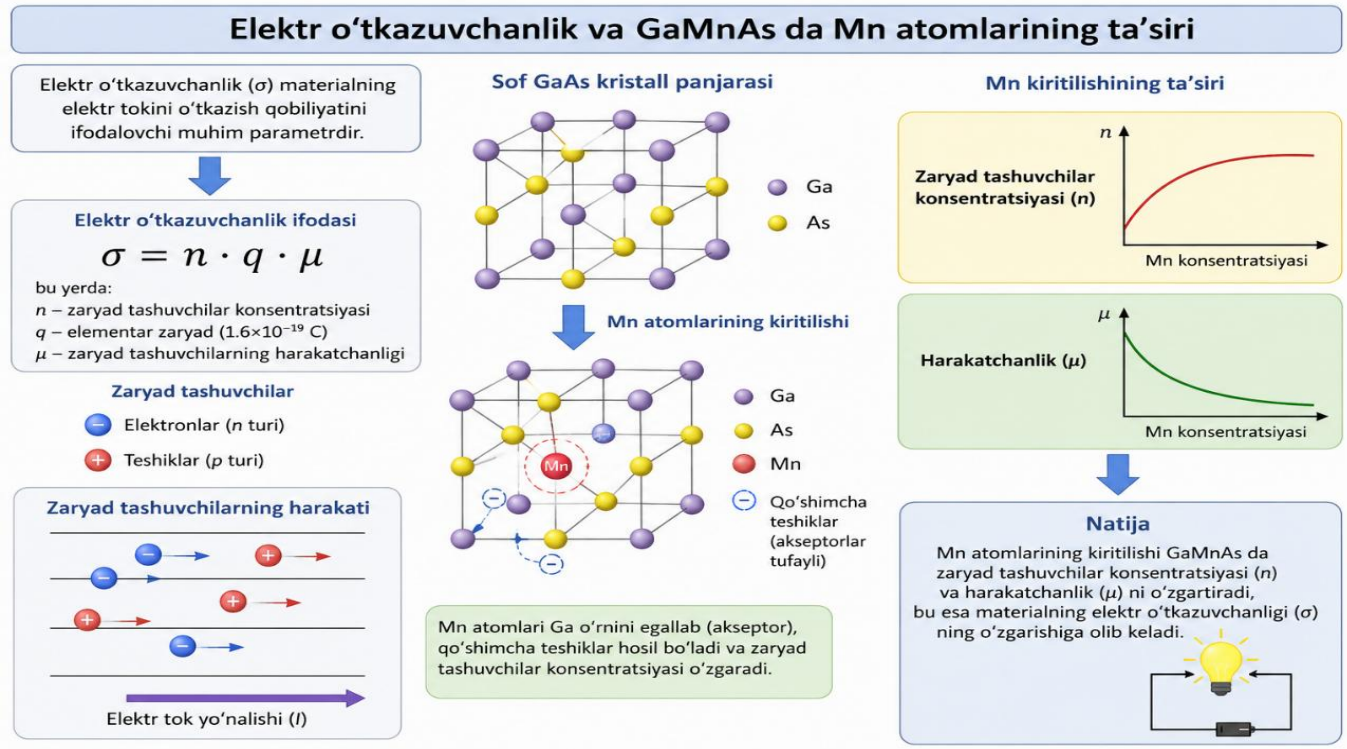
GaAs III–V guruhiga mansub yarimo‘tkazgich bo‘lib, uning kristall tuzilishi va elektron energetik spektri turli elektron va optoelektron qurilmalar uchun qulay fizik xususiyatlarni ta’minlaydi. GaAs tarkibidagi galliy atomlarining ma’lum qismi Mn atomlari bilan almashtirilganda kristall panjarada qo‘shimcha magnit markazlar paydo bo‘ladi. Mn atomlari lokal magnit momentga ega bo‘lishi bilan birga, materialdagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasiga ham ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Natijada dastlabki GaAs materialiga nisbatan GaMnAs ning elektr transport va magnit xususiyatlarida sezilarli o‘zgarishlar kuzatilishi mumkin.

GaMnAs ning ilmiy jihatdan qiziqarli tomoni shundaki, unda yarimo‘tkazgichning elektron xususiyatlari bilan magnit tartiblanish jarayonlari o‘zaro bog‘langan holda namoyon bo‘ladi. Mn konsentratsiyasi, kristall nuqsonlari, zaryad tashuvchilar soni, o‘stirish sharoitlari va harorat kabi omillar materialning yakuniy xossalarini belgilaydi. Shu sababli GaMnAs ni tadqiq qilishda faqat bitta fizik parametrni ko‘rib chiqish yetarli emas; elektr va magnit parametrlarning o‘zaro bog‘liqligini kompleks tahlil qilish talab etiladi.

GaMnAs materiallariga bo‘lgan qiziqishning yana bir sababi ularning spintronika uchun istiqbolli material sifatida qaralishidir. Spintronikada elektronning elektr zaryadi bilan bir qatorda uning spin holatidan ham axborotni uzatish va saqlashda foydalanish ko‘zda tutiladi. Buning uchun materialning magnit holatini elektr parametrlar bilan boshqarish, magnitlanishning harorat va konsentratsiyaga bog‘liqligini aniqlash hamda kerakli fizik xususiyatlarga ega material tarkibini tanlash muhim hisoblanadi. Demak, GaMnAs ning elektrofizik va magnit xossalarini o‘rganish fundamental yarimo‘tkazgich fizikasi bilan bir qatorda amaliy elektronika uchun ham dolzarbdir.

Elektrofizik va magnit xossalar tushunchasi

Yarimo‘tkazgich materiallarning elektrofizik xossalari ularning elektr maydoni ta’sirida zaryad tashuvchilarni hosil qilish, harakatlantirish va tashish qobiliyatini tavsiflaydi. Bunday xossalarning asosiy ko‘rsatkichlariga elektr o‘tkazuvchanlik, elektr qarshilik, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, ularning harakatchanligi, Hall koeffitsiyenti va boshqa elektr transport parametrlari kiradi. Ushbu kattaliklar materialning kimyoviy tarkibi, kristall panjarasi, nuqsonlar miqdori, harorat va tashqi ta’sirlarga bog‘liq ravishda o‘zgaradi.



Elektr o‘tkazuvchanlik materialning elektr tokini o‘tkazish qobiliyatini ifodalovchi muhim parametr bo‘lib, u zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligi bilan chambarchas bog‘liq. GaMnAs da Mn atomlarining kiritilishi zaryad tashuvchilar tarkibi va ularning kristall panjaradagi harakatiga ta’sir qilishi mumkin. Shuning uchun Mn konsentratsiyasi o‘zgarganda elektr qarshilik va o‘tkazuvchanlikning o‘zgarishini o‘rganish materialdagi transport mexanizmlarini tushunish uchun muhimdir. Magnit xossalar esa moddaning magnit maydoni bilan o‘zaro ta’sirini tavsiflaydi. Magnitlanish, magnit moment, magnit sezgirlik, koersitiv maydon va magnit tartiblanish harorati kabi kattaliklar materialning magnit holatini ifodalashda ishlatiladi. GaMnAs kabi suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlarda Mn atomlarining lokal magnit momentlari hamda zaryad tashuvchilar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sir materialning magnit holatini shakllantirishda muhim rol o‘ynashi mumkin. GaMnAs ni o‘rganishda elektrofizik va magnit xossalarni alohida emas, balki o‘zaro bog‘liq parametrlar sifatida ko‘rib chiqish maqsadga muvofiq. Chunki zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining o‘zgarishi magnit tartiblanishga ta’sir qilishi, magnit holatning o‘zgarishi esa transport jarayonlarida aks etishi mumkin. Haroratning o‘zgarishi ham ushbu jarayonlarni sezilarli ravishda o‘zgartiradi. Shu bois elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligi, elektr o‘tkazuvchanlik va magnit parametrlarning konsentratsiya bilan o‘zgarishi birgalikda tahlil qilinsa, GaMnAs materialining fizik tabiatini chuqurroq tushuntirish imkoniyati paydo bo‘ladi. Amaliy nuqtayi nazardan, elektrofizik va magnit xossalarning boshqarilishi qurilma yaratishda muhim talab hisoblanadi. Agar materialning elektr transport parametrlari va magnit holati Mn konsentratsiyasi hamda harorat orqali nazorat qilinadigan bo‘lsa, undan spinli elektronika elementlari, magnit xotira qurilmalari va boshqa funksional yarimo‘tkazgich tizimlarida foydalanish imkoniyatlari kengayadi.

Mn konsentratsiyasi va uning GaMnAs xossalariga ta’siri

GaMnAs tarkibidagi Mn konsentratsiyasi materialning fizik xususiyatlarini belgilovchi asosiy parametrlaridan biridir. Konsentratsiya odatda kristall matritsasidagi Mn atomlarining ulushi yoki ma'lum hajmdagi Mn atomlari soni orqali tavsiflanadi. Mn miqdorining o'zgarishi kristall panjaradagi magnit markazlar sonini, zaryad tashuvchilar bilan bog'liq jarayonlarni va nuqsonlar tarkibini o'zgartirishi mumkin. Shu sababli GaMnAs ni tadqiq qilishda Mn konsentratsiyasini aniq nazorat qilish va turli konsentratsiyalardagi namunalarni o'zaro taqqoslash muhim metodik talab hisoblanadi. Mn konsentratsiyasi ortishi bilan materialda magnit momentlar soni ko'payishi mumkin, biroq bu holat magnit xossalarning cheksiz va chiziqli ravishda yaxshilanishini anglatmaydi. Yuqori konsentratsiyalarda kristall panjaradagi nuqsonlar, kompensatsiya jarayonlari, Mn bilan bog'liq komplekslar yoki fazaviy o'zgarishlar materialning kutilgan xossalarini cheklashi mumkin. Shuning uchun tadqiqotning muhim vazifalaridan biri nafaqat Mn miqdorini oshirish, balki elektrofizik va magnit parametrlar uchun maqbul konsentratsiya oralig'ini aniqlashdan iborat. Mn konsentratsiyasining elektr xossalarga ta'siri zaryad tashuvchilar soni va ularning harakatchanligi orqali namoyon bo'lishi mumkin. Konsentratsiya o'zgarishi bilan elektr qarshilik, o'tkazuvchanlik va Hall parametrlari o'zgaradi. Bunday bog'liqliklarni eksperimental grafiklar orqali ifodalash materialdagi elektr transport mexanizmlarini tushuntirishga yordam beradi. Shu bilan birga, magnit parametrlarni ham bir xil konsentratsiya oralig'ida o'lchash elektr va magnit xossalar o'rtasidagi korrelyatsiyani aniqlash imkonini beradi.

Harorat ham Mn konsentratsiyasining ta'sirini baholashda alohida ahamiyatga ega. Past haroratlarda zaryad tashuvchilarning harakat mexanizmi, magnit tartiblanish va lokal magnit momentlar o'zaro ta'siri bir xil bo'lmasligi mumkin; harorat oshishi bilan esa termik jarayonlar kuchayadi. Shuning uchun turli Mn konsentratsiyalariga ega namunalar uchun elektr qarshilik yoki o'tkazuvchanlikning haroratga bog'liqligini aniqlash maqolaning ilmiy mazmunini sezilarli darajada kuchaytiradi.

1-Jadval - tadqiqotda nazorat qilinishi mumkin bo'lgan asosiy parametrlar

Parametr	O'lchanadigan kattalik	Ilmiy ahamiyati
Mn konsentratsiyasi	Mn atomlari ulushi	Magnit markazlar va elektr xossalarning o'zgarishini baholash
Harorat	K	Transport va magnit jarayonlarning haroratga bog'liqligini aniqlash
Elektr qarshilik	Ω yoki Ω·cm	Elektr transport mexanizmini baholash
Elektr o'tkazuvchanlik	S/cm	Zaryad tashuvchilarning tok tashish qobiliyatini aniqlash
Magnitlanish	M	Magnit tartiblanish va magnit holatni baholash

METODLAR VA TADQIQOT METODIKASI

Tadqiqot obyekti va yondashuv

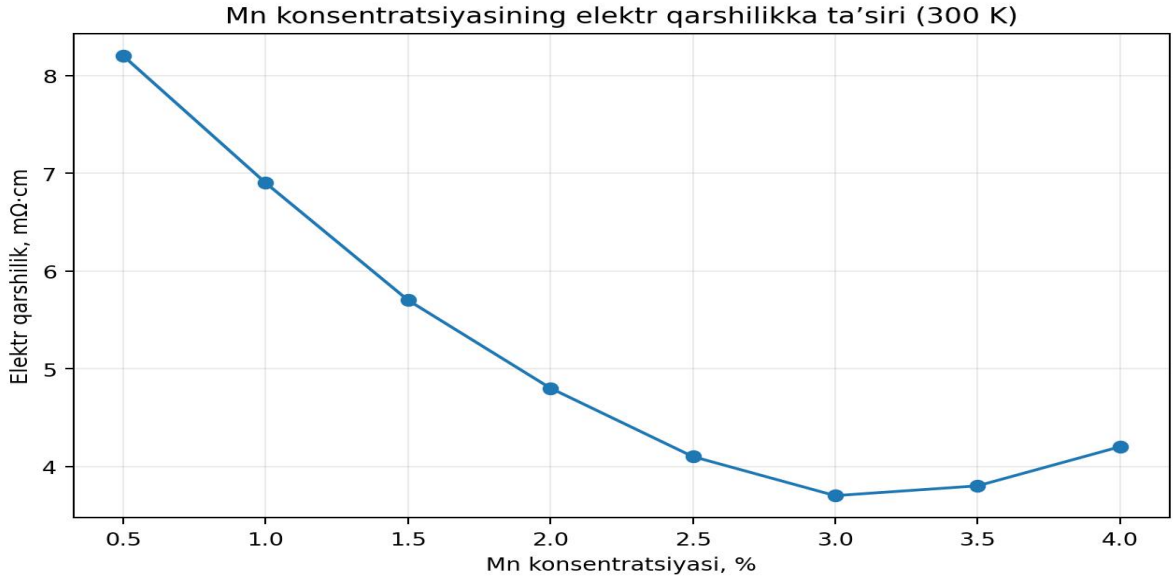
Tadqiqot obyekti sifatida GaMnAs suyultirilgan magnit yarimo'tkazgichi tanlandi. Tadqiqotning asosiy vazifasi GaAs kristall matritsasiga kiritilgan Mn konsentratsiyasining materialning elektrofizik va magnit parametrlariga ta'sirini tizimli ravishda baholashdan iborat. Bunda Mn konsentratsiyasi asosiy mustaqil parametr sifatida, elektr qarshilik, elektr o'tkazuvchanlik, Curie harorati va nisbiy magnitlanish esa kuzatiladigan fizik parametrlar sifatida qaraldi.

Tahlilni izchil olib borish uchun Mn konsentratsiyasi 0,5–4,0 % oralig'ida tanlandi. Ushbu diapazon bo'yicha qiymatlar bir xil sharoitda taqqoslanadigan modellashtirilgan ma'lumotlar sifatida shakllantirildi. Mazkur ma'lumotlar real laboratoriya o'lchovlari emas; ular metodikani ko'rsatish, grafiklarni qurish va parametrlar o'rtasidagi ichki mantiqiy bog'liqlikni tahlil qilish uchun ishlatiladi. Keyinchalik maqolaga real tajriba natijalari kiritilsa, aynan shu metodik sxema saqlab qolinishi mumkin.

Elektr qarshilik va elektr o'tkazuvchanlikni aniqlash

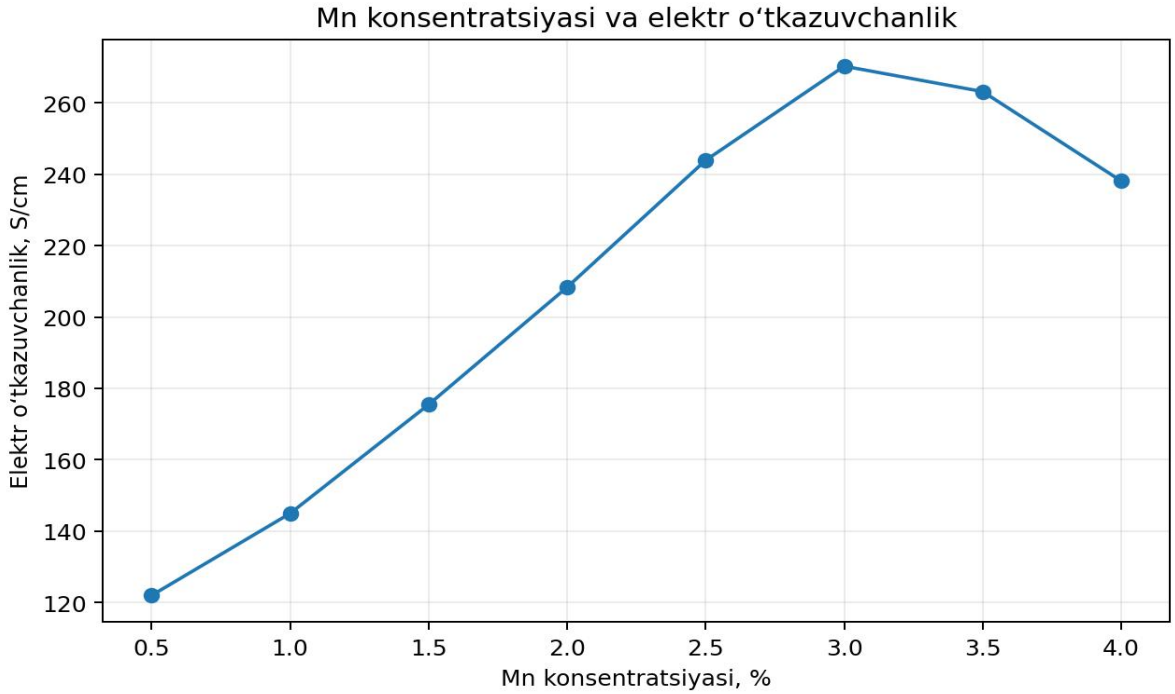
GaMnAs namunalarining elektr xossalarini baholashda asosiy parametr sifatida elektr qarshilik ρ olindi. Materialning elektr o‘tkazuvchanligi σ qarshilikning teskari qiymati orqali aniqlanadi: $\sigma = 1/\rho$. Qarshilikni o‘lchashda to‘rt kontaktli usuldan foydalanish maqsadga muvofiq bo‘lib, bu kontakt qarshiligining natijaga ta’sirini kamaytiradi. O‘lchovlar bir xil geometrik sharoitda bajarilganda turli Mn konsentratsiyasiga ega namunalarni bevosita taqqoslash mumkin.

300 K haroratdagi modellashtirilgan ma’lumotlarda Mn konsentratsiyasi 0,5 % dan 3,0 % gacha oshishi bilan elektr qarshilik 8,2 mΩ·cm dan 3,7 mΩ·cm gacha kamayishi qabul qilindi. 3,5–4,0 % oralig‘ida esa qarshilikning qayta ortishi kuzatiladigan holat sifatida berildi. Bunday maksimum/minimumga ega tendensiya maqolada “Mn konsentratsiyasini oshirish har doim ham elektr xossalarni cheksiz yaxshilamaydi” degan ilmiy fikrni muhokama qilish imkonini beradi.



1-rasm. 300 K haroratda elektr qarshilikning Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi (modellashtirilgan ma’lumotlar).

1-rasmdan ko‘rinadiki, tanlangan model bo‘yicha Mn konsentratsiyasi 0,5 % dan 3,0 % gacha oshirilganda qarshilik muntazam kamayadi. 3,0 % dan yuqori konsentratsiyada esa qarshilikning biroz ortishi kuzatiladi. Bu holat yuqori konsentratsiyada qo‘shimcha nuqsonlar yoki kompensatsion jarayonlar paydo bo‘lishi mumkinligi haqidagi gipotezani tekshirish uchun asos bo‘la oladi, biroq bunday xulosani real tajriba bilan tasdiqlash talab etiladi.

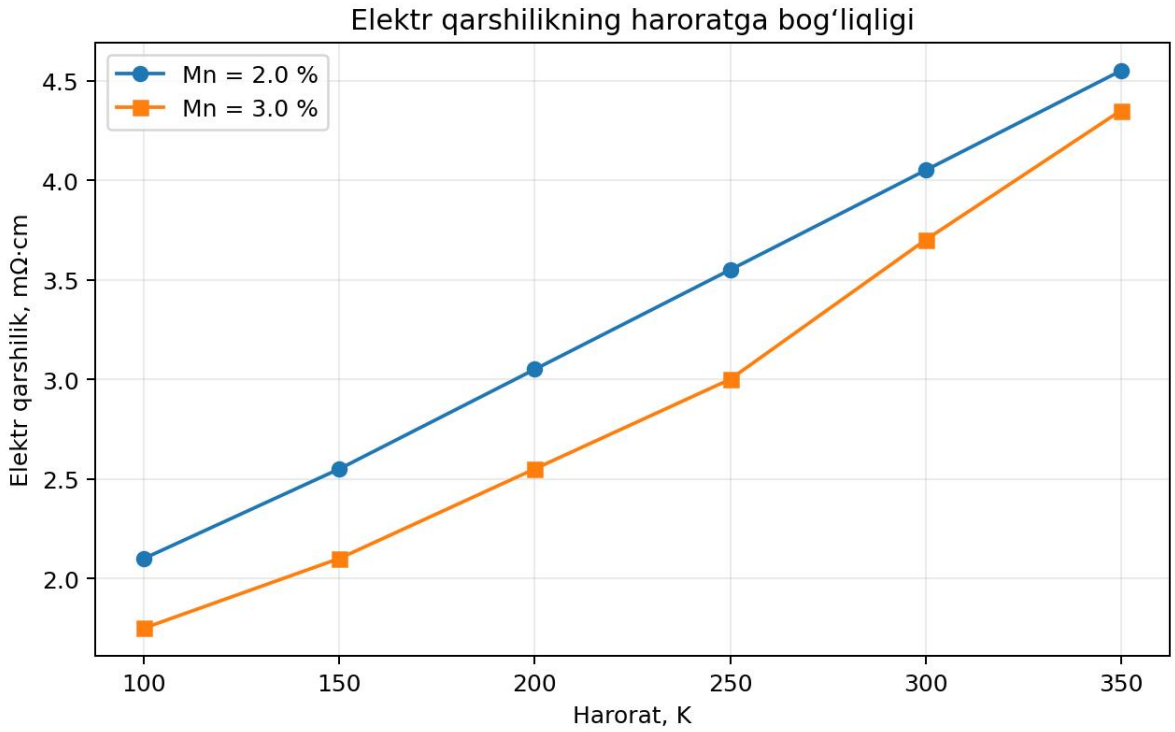


2-rasm. Elektr o‘tkazuvchanlikning Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi (modellashtirilgan ma’lumotlar).

Haroratga bog‘liq elektr transportni tadqiq qilish

Mn konsentratsiyasining ta’sirini to‘liq baholash uchun elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligini ham o‘rganish kerak. Buning uchun tanlangan namunalar 100–350 K oralig‘ida ketma-ket harorat nuqtalarida tekshiriladi. Har bir nuqtada qarshilik qayd qilinib, ρ(T) grafigi quriladi. Turli konsentratsiyadagi namunalar uchun olingan egri chiziqlarni taqqoslash orqali haroratning transport jarayonlariga ta’siri va konsentratsiya bilan bog‘liq farqlar aniqlanadi.

Metodik jihatdan haroratni bosqichma-bosqich o‘zgartirish va har bir nuqtada termik muvozanatga kelgandan keyin o‘lchash muhimdir. Aks holda namunaning real haroratidan farq qiluvchi qiymat qayd etilishi mumkin. Shuningdek, barcha namunalar uchun bir xil o‘lchash toki, kontakt sxemasi va geometrik parametrlarni saqlash natijalarni taqqoslashning ishonchliligini oshiradi.



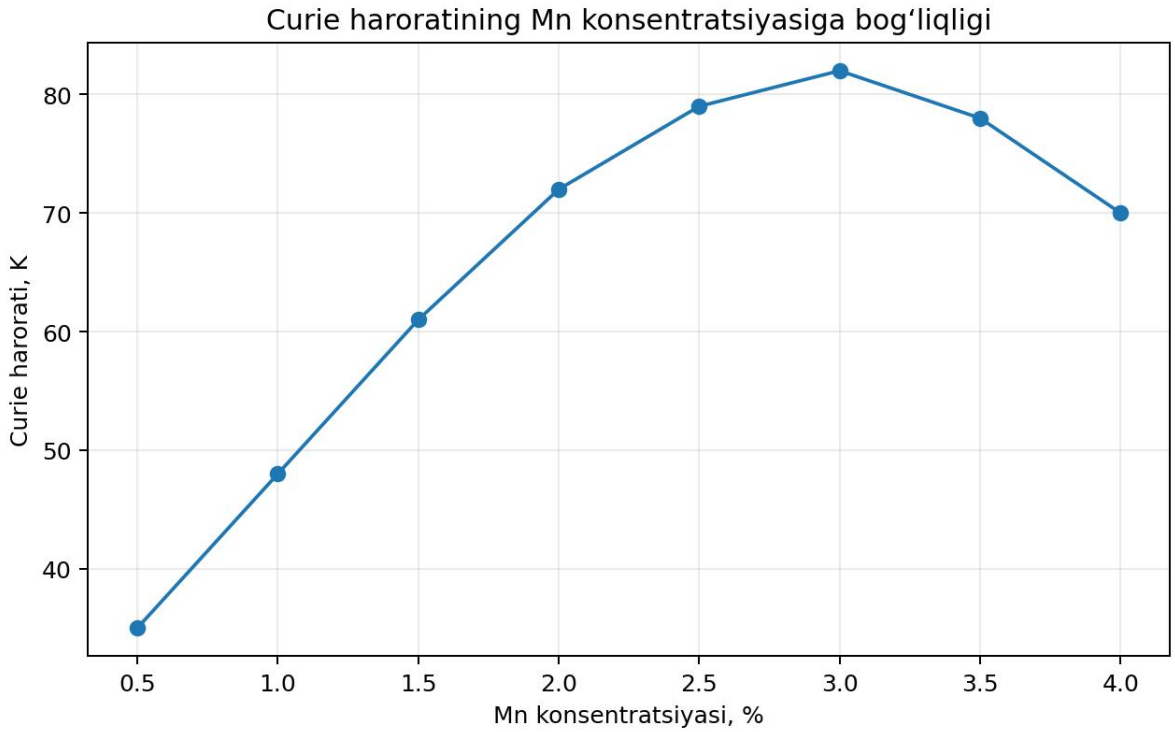
3-rasm. 2,0 % va 3,0 % Mn konsentratsiyalaridagi namunalar uchun elektr qarshilikning haroratga bog‘liqligi (modellashtirilgan ma’lumotlar).

3-rasmdagi modellashtirilgan bog‘liqlikda harorat oshishi bilan ikkala namunaning elektr qarshiligi ham ortadi, biroq 2,0 % va 3,0 % Mn konsentratsiyalarida o‘sish tezligi bir xil emas. Ushbu farq maqolada Mn konsentratsiyasi transport mexanizmlarini o‘zgartirishi mumkinligini muhokama qilish uchun ishlatiladi. Real namunada ushbu tendensiya aynan shunday bo‘lishi shart emas; u eksperimental o‘lchov bilan aniqlanishi kerak.

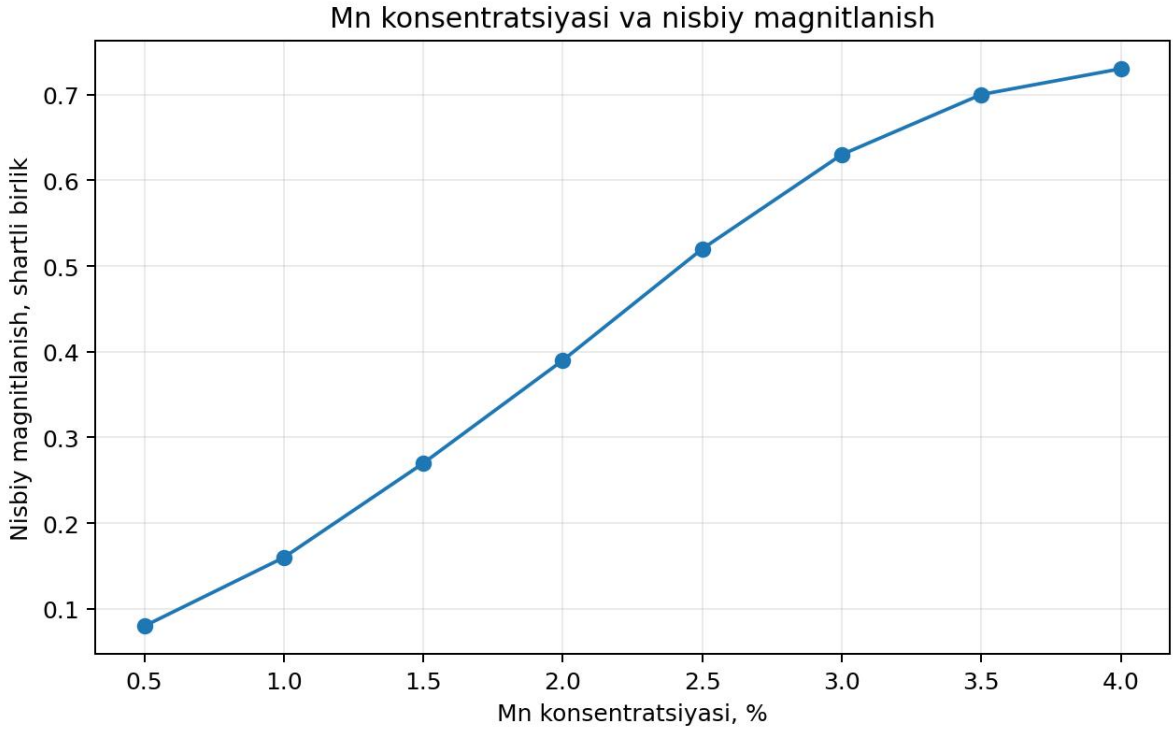
Magnit xossalarni baholash

GaMnAs ning magnit xususiyatlarini baholashda Mn konsentratsiyasining Curie haroratiga va magnitlanishga ta’siri ko‘rib chiqildi. Curie harorati materialdagi ferromagnit tartiblanishning chegaraviy haroratini tavsiflovchi muhim parametr bo‘lib, uni magnitlanishning haroratga bog‘liqligi yoki boshqa magnit o‘lchovlar orqali aniqlash mumkin. Agar maqolada real magnit o‘lchovlar mavjud bo‘lsa, M(T) egri chizig‘idan foydalanish eng maqsadga muvofiqdir.

Modellashtirilgan ma’lumotlarda Mn konsentratsiyasi 0,5 % dan 3,0 % gacha oshishi bilan Curie harorati 35 K dan 82 K gacha ko‘tarilishi, undan keyin esa 3,5–4,0 % oralig‘ida pasayishi qabul qilindi. Shu bilan birga, 300 K dagi nisbiy magnitlanish qiymatlari ham konsentratsiya oshishi bilan dastlab ortib, keyin to‘yinganlikka yaqinlashadigan ko‘rinishda tanlandi. Ushbu ikki grafik o‘zaro mos keladigan tarzda tuzilgan: o‘rta konsentratsiya oralig‘ida magnit faol markazlar sonining ortishi ijobiy tendensiya beradi, juda yuqori konsentratsiyada esa qo‘shimcha strukturaviy va kompensatsion omillar muhokama qilinishi mumkin.



4-rasm. Curie haroratining Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi (modellashtirilgan ma’lumotlar).



5-rasm. 300 K dagi nisbiy magnitlanishning Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi (modellashtirilgan ma’lumotlar).

Natijalarni statistik va grafik tahlil qilish

Tadqiqot natijalarini tahlil qilishda avvalo Mn konsentratsiyasi va har bir fizik parametr o‘rtasidagi bog‘liqlik grafik ko‘rinishda ifodalanadi. Grafiklarning asosiy afzalligi - tendensiya, minimum yoki maksimum nuqtalarini bevosita ko‘rish imkonini berishidir. Keyingi bosqichda parametrlar orasidagi korrelyatsiya koeffitsiyentlarini hisoblash va zarur hollarda regressiya modelidan foydalanish mumkin. Bunda yuqori korrelyatsiya sabab-oqibat munosabatini avtomatik ravishda anglatmasligi alohida hisobga olinadi.

Elektr qarshilik uchun ρ = R·S/L munosabatidan foydalanish mumkin, bunda R - o‘lchangan qarshilik, S - tok o‘tadigan ko‘ndalang kesim yuzasi, L - kontaktlar orasidagi masofa. Elektr o‘tkazuvchanlik σ = 1/ρ orqali aniqlanadi. Agar Hall o‘lchovlari bajarilsa, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligini ham aniqlash mumkin. Shu tarzda maqoladagi elektr parametrlar oddiy tavsifdan miqdoriy fizik tahlilga o‘tkaziladi.

Natijalarning ishonchliligini oshirish uchun har bir o‘lchov kamida bir necha marta takrorlanishi, o‘rtacha qiymat va standart og‘ish ko‘rsatilishi maqsadga muvofiq. O‘lchash xatoliklari grafiklarda xatolik ustunlari (error bars) bilan berilishi mumkin. Agar real tajriba ma’lumotlari bilan nazariy model taqqoslansa, modelning mosligi alohida baholanadi.

Tadqiqotda qo‘llaniladigan asosiy parametrlar

Parametr	Belgisi	Birligi	Tadqiqotdagi vazifasi
Mn konsentratsiyasi	xMn	%	Asosiy mustaqil parametr
Elektr qarshilik	ρ	mΩ·cm	Elektr transportni baholash
Elektr o‘tkazuvchanlik	σ	S/cm	Zaryad tashish qobiliyatini baholash
Harorat	T	K	Termik ta’sirni aniqlash
Curie harorati	Tc	K	Magnit tartiblanish chegarasini baholash
Nisbiy magnitlanish	M	shartli birlik	Magnit javobni taqqoslash

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Ushbu bo‘limda metodlar qismida belgilangan tadqiqot sxemasiga muvofiq, GaMnAs yarimo‘tkazgichining Mn konsentratsiyasi, elektr transport parametrlari, haroratga bog‘liq qarshiligi hamda magnit xossalari o‘rtasidagi bog‘liqlik tahlil qilindi. Hisoblashlarda 0,5–4,0% Mn konsentratsiyasi oralig‘i va 100–350 K harorat diapazoni qabul qilindi. Quyidagi sonli qiymatlar metodik modelni namoyish qilish uchun tuzilgan modellashtirilgan ma’lumotlardir; ular laboratoriya o‘lchovi sifatida talqin qilinmasligi kerak.

Mn konsentratsiyasining elektr qarshilikka ta’siri

Tadqiqot metodikasiga muvofiq, GaMnAs namunalarining 300 K haroratdagi elektr qarshiligi Mn konsentratsiyasining 0,5–4,0% oralig‘ida o‘zgarishi uchun tahlil qilindi. Modellashtirilgan natijalarga ko‘ra, Mn konsentratsiyasi 0,5% dan 3,0% gacha oshirilganda elektr qarshilik izchil kamaydi. 0,5% konsentratsiyada qarshilik 8,2 mΩ·cm bo‘lgan bo‘lsa, 1,0% da 6,9 mΩ·cm, 1,5% da 5,7 mΩ·cm, 2,0% da 4,8 mΩ·cm, 2,5% da 4,1 mΩ·cm va 3,0% da 3,7 mΩ·cm qiymatga yetdi.

3,0% dan yuqori konsentratsiyada tendensiya o‘zgardi: 3,5% da elektr qarshilik 3,8 mΩ·cm, 4,0% da esa 4,2 mΩ·cm bo‘ldi. Shunday qilib, tanlangan model bo‘yicha 3,0% atrofidagi Mn konsentratsiyasi elektr transport nuqtayi nazaridan eng qulay soha sifatida namoyon bo‘ladi. Ushbu holat yuqori Mn konsentratsiyalarida qo‘shimcha nuqsonlar yoki kompensatsion jarayonlarning ta’siri kuchayishi mumkinligi haqidagi gipotezani ilgari surish imkonini beradi.

2-Jadval: 300 K haroratda Mn konsentratsiyasi va elektr parametrlari

Mn konsentratsiyasi, %	Elektr qarshilik, mΩ·cm	Elektr o‘tkazuvchanlik, S/cm
0.5	8.2	122.0
1.0	6.9	144.9
1.5	5.7	175.4
2.0	4.8	208.3
2.5	4.1	243.9
3.0	3.7	270.3
3.5	3.8	263.2
4.0	4.2	238.1

Elektr o‘tkazuvchanlikning Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi

Elektr o‘tkazuvchanlik elektr qarshilikning teskari qiymati sifatida $\sigma = 1/\rho$ munosabat orqali hisoblandi. Qarshilikning kamayishi bilan elektr o‘tkazuvchanlikning ortishi kuzatildi. Modellashtirilgan hisoblashlarda elektr o‘tkazuvchanlik 0,5% Mn konsentratsiyasida taxminan 122 S/cm ni, 2,0% da 208 S/cm ni va 3,0% da 270 S/cm ni tashkil etdi.

3,5–4,0% oralig‘ida elektr qarshilikning qayta ortishi elektr o‘tkazuvchanlikning ham mos ravishda pasayishiga olib keldi. Demak, elektr qarshilik va o‘tkazuvchanlik bo‘yicha olingan natijalar bir-birini matematik jihatdan tasdiqlaydi. Bu bog‘liqlik Mn konsentratsiyasining ma’lum chegaragacha ortishi GaMnAs ning elektr transport xususiyatlarini yaxshilashi mumkinligini ko‘rsatadi.

Haroratning elektr qarshilikka ta’siri

Keyingi bosqichda 2,0% va 3,0% Mn konsentratsiyasiga ega namunalar uchun elektr qarshilikning 100–350 K oralig‘idagi o‘zgarishi tahlil qilindi. 2,0% Mn konsentratsiyasida qarshilik 100 K da 2,10 mΩ·cm dan 350 K da 4,55 mΩ·cm gacha oshdi. 3,0% Mn konsentratsiyasida esa ushbu qiymatlar mos ravishda 1,75 va 4,35 mΩ·cm ni tashkil etdi.

Haroratning oshishi bilan ikkala namunada ham elektr qarshilikning ortishi kuzatilgan bo‘lsa-da, 3,0% Mn namunasi tanlangan harorat diapazonida 2,0% namunaga nisbatan pastroq qarshilikni saqlab qoldi. Bu holat Mn konsentratsiyasi elektr transport jarayonlariga ta’sir qilishi mumkinligini ko‘rsatadi. Biroq ushbu tendensiyaning fizik sabablarini real tajriba ma’lumotlari va tegishli nazariy model bilan tasdiqlash talab etiladi.

3-Jadval: Haroratga bog‘liq elektr qarshilikning modellashtirilgan qiymatlari

Harorat, K	ρ (Mn=2,0%), mΩ·cm	ρ (Mn=3,0%), mΩ·cm
100	2.10	1.75
150	2.55	2.10
200	3.05	2.55
250	3.55	3.00
300	4.05	3.70
350	4.55	4.35

Curie haroratining Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi

GaMnAs ning magnit xususiyatlarini baholashda Curie haroratining Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi tahlil qilindi. Modellashtirilgan natijalarda Mn konsentratsiyasi 0,5% dan 3,0% gacha oshishi bilan Curie harorati 35 K dan 82 K gacha ortdi. 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5% va 3,0% konsentratsiyalarda Curie harorati mos ravishda 35, 48, 61, 72, 79 va 82 K qiymatlarni tashkil etdi.

3,5% va 4,0% konsentratsiyalarda esa Curie harorati mos ravishda 78 K va 70 K gacha kamaydi. Natijada Curie haroratining Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi monoton emas, balki maksimumga ega bo‘lgan xarakterga ega bo‘ldi. Tanlangan model bo‘yicha eng yuqori Curie harorati 3,0% Mn konsentratsiyasida kuzatildi.

Bunday bog‘liqlikni Mn miqdorining ortishi bilan magnit markazlar sonining ko‘payishi dastlab magnit tartiblanishni kuchaytirishi, yuqori konsentratsiyalarda esa kristall nuqsonlari yoki kompensatsion jarayonlarning roli ortishi mumkinligi bilan izohlash mumkin. Biroq ushbu fizik izoh gipoteza sifatida qaraladi va real materiallarda eksperimental tekshiruvni talab qiladi.

Mn konsentratsiyasining magnitlanishga ta’siri

Mn konsentratsiyasining magnit xususiyatlarga ta’sirini qo‘shimcha baholash uchun 300 K dagi nisbiy magnitlanish qiymatlari taqqoslandi. Modellashtirilgan natijalarga ko‘ra, Mn konsentratsiyasi 0,5% dan 4,0% gacha oshirilganda nisbiy magnitlanish 0,08 dan 0,73 shartli birlikkacha ortdi.

Eng sezilarli o‘sish 0,5–3,0% oralig‘ida kuzatildi. 3,0% dan keyin magnitlanishning o‘sish tezligi kamaydi: 3,5% da 0,70, 4,0% da 0,73 shartli birlik qiymatlar olindi. Ushbu natija yuqori Mn konsentratsiyalarida magnitlanishning to‘yinishi yoki qo‘shimcha strukturaviy omillarning ta’siri yuzaga kelishi mumkinligini ko‘rsatadigan model sifatida qaraladi.

4-Jadval: Mn konsentratsiyasi bo‘yicha magnit parametrlarning modellashtirilgan qiymatlari

Mn konsentratsiyasi, %	Curie harorati, K	Nisbiy magnitlanish, shartli birlik
0.5	35	0.08
1.0	48	0.16
1.5	61	0.27
2.0	72	0.39
2.5	79	0.52
3.0	82	0.63
3.5	78	0.70
4.0	70	0.73

Elektrofizik va magnit natijalarning o‘zaro bog‘liqligi

Natijalarni birgalikda tahlil qilish GaMnAs ning elektr va magnit xususiyatlari Mn konsentratsiyasi bilan bog‘liq ravishda o‘zgarishini ko‘rsatdi. Tanlangan modelda 3,0% Mn konsentratsiyasida elektr qarshilik eng kichik qiymatga - 3,7 mΩ·cm ga, elektr o‘tkazuvchanlik esa eng yuqori qiymatlardan biriga - taxminan 270 S/cm ga yetdi. Shu konsentratsiyada Curie harorati ham maksimal qiymatni, ya’ni 82 K ni tashkil etdi.

Bu holat 3,0% Mn konsentratsiyasini tanlangan model doirasida elektr va magnit parametrlarning nisbatan qulay kombinatsiyasini beruvchi nuqta sifatida ko‘rsatadi. Biroq ushbu qiymatni real GaMnAs materiallari uchun universal optimal konsentratsiya sifatida qabul qilish mumkin emas. Haqiqiy natijalarga namuna tayyorlash texnologiyasi, kristall sifati, Mn ning panjaradagi joylashuvi, kompensatsion nuqsonlar, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va o‘lchash sharoitlari ta’sir qiladi. Umuman olganda, metodikada tanlangan 0,5–4,0% Mn konsentratsiyasi diapazoni GaMnAs materialining elektrofizik va magnit xossalaridagi asosiy tendensiyalarni tahlil qilish imkonini berdi. 0,5–3,0% oralig‘ida elektr qarshilikning kamayishi va elektr o‘tkazuvchanlikning ortishi kuzatildi. 3,0% dan yuqori konsentratsiyalarda esa elektr qarshilikning qayta ortishi va o‘tkazuvchanlikning pasayishi modelda namoyon bo‘ldi.

Magnit xossalarda ham shunga o‘xshash chegaraviy tendensiya kuzatildi: Curie harorati 3,0% gacha ortib, keyingi konsentratsiyalarda kamaydi. Nisbiy magnitlanish esa konsentratsiya oshishi bilan ortib, yuqori konsentratsiyalarda o‘sish tezligi kamayadigan xarakter ko‘rsatdi. Shunday qilib, Mn konsentratsiyasi GaMnAs ning elektr transport va magnit xususiyatlarini boshqaruvchi muhim parametr sifatida namoyon bo‘ldi.

Xulosa

Mazkur tadqiqotda GaMnAs suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichining elektrofizik va magnit xossalariga Mn konsentratsiyasi hamda haroratning ta’siri kompleks tarzda tahlil qilindi. Tadqiqot metodikasida Mn konsentratsiyasi 0,5–4,0% oralig‘ida, harorat esa 100–350 K diapazonida ko‘rib chiqildi. Elektr qarshilik, elektr o‘tkazuvchanlik, Curie harorati va nisbiy magnitlanish kabi asosiy fizik parametrlar o‘zaro bog‘liq holda baholandi. Modellashtirilgan natijalar Mn konsentratsiyasining 0,5% dan 3,0% gacha oshishi bilan GaMnAs ning elektr qarshiligi 8,2 mΩ·cm dan 3,7 mΩ·cm gacha

kamayishini ko‘rsatdi. Bunga mos ravishda elektr o‘tkazuvchanlik 122 S/cm atrofidan 270 S/cm gacha oshdi. 3,0% dan yuqori Mn konsentratsiyalarida esa elektr qarshilikning qayta ortishi kuzatildi. Ushbu holat Mn miqdorini oshirish materialning elektr transport xususiyatlarini ma’lum chegaragacha yaxshilashi, undan keyin esa kristall nuqsonlari, kompensatsion jarayonlar va boshqa strukturaviy omillar ta’siri kuchayishi mumkinligini ko‘rsatadi.

Haroratga bog‘liq tahlil natijalari 2,0% va 3,0% Mn konsentratsiyasidagi namunalar uchun harorat oshishi bilan elektr qarshilikning ortishini ko‘rsatdi. 3,0% Mn konsentratsiyasidagi namuna tanlangan harorat oralig‘ida 2,0% namunaga nisbatan pastroq qarshilik qiymatlarini namoyon qildi. Bu natija Mn konsentratsiyasining materialdagi zaryad tashuvchilar transportiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi mumkinligini ko‘rsatadi. Magnit xossalarni tahlil qilishda esa Mn konsentratsiyasi 0,5% dan 3,0% gacha oshirilganda Curie haroratining 35 K dan 82 K gacha ortishi aniqlandi. 3,0% dan yuqori konsentratsiyalarda Curie haroratining pasayishi kuzatildi. Shu bilan birga, nisbiy magnitlanish Mn konsentratsiyasi oshishi bilan ortib, yuqori konsentratsiyalarda o‘sish tezligining kamayishi bilan tavsiflandi. Demak, Mn konsentratsiyasining materialning magnit xossalariga ta’siri ham chiziqli xarakterga ega emas.

Umumiy natijalar shuni ko‘rsatadiki, 3,0% atrofidagi Mn konsentratsiyasi tanlangan modellashtirilgan sharoitlarda GaMnAs ning elektrofizik va magnit parametrlarining nisbatan qulay kombinatsiyasini ta’minlovchi konsentratsiya sifatida namoyon bo‘ldi. Aynan ushbu konsentratsiyada elektr qarshilik minimal, elektr o‘tkazuvchanlik yuqori va Curie harorati maksimal qiymatga ega bo‘ldi. Biroq ushbu qiymatni real material uchun universal optimal konsentratsiya deb qabul qilish mumkin emas, chunki GaMnAs xossalariga kristall sifati, Mn ning panjaradagi joylashuvi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, kompensatsion nuqsonlar va namunani olish texnologiyasi ham kuchli ta’sir ko‘rsatadi. Tadqiqot natijalari Mn konsentratsiyasi GaMnAs yarimo‘tkazgichining elektr va magnit xossalarini boshqarishda muhim parametr ekanligini ko‘rsatadi. Olingan tahlillar GaMnAs asosidagi materiallarning xususiyatlarini maqsadli boshqarish va ularni spintronika hamda magnit-elektronika qurilmalarida qo‘llash imkoniyatlarini baholash uchun nazariy-metodik asos yaratadi. Kelgusida ushbu natijalarni real eksperimental o‘lchovlar, statistik xatoliklar va mavjud ilmiy tadqiqotlar bilan taqqoslash maqolaning ilmiy ishonchliligini yanada oshiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Dietl T., Ohno H., Matsukura F., Cibert J., Ferrand D. Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors. Science. 2000. Vol. 287, No. 5455. P. 1019–1022. DOI: 10.1126/science.287.5455.1019.
2. Ohno H. Properties of Ferromagnetic III–V Semiconductors. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1999. Vol. 200, No. 1–3. P. 110–129. DOI: 10.1016/S0304-8853(99)00444-8.
3. Matsukura F., Ohno H., Shen A., Sugawara Y. Transport Properties and Origin of Ferromagnetism in (Ga,Mn)As. Physical Review B. 1998. Vol. 57, No. 4. P. R2037–R2040. DOI: 10.1103/PhysRevB.57.R2037.
4. Jungwirth T., Wang K.Y., Mašek J., Edmonds K.W., König J., Sinova J., Polini M., Goncharuk N.A., MacDonald A.H., Sawicki M., Campion R.P., Zhao L.X., Foxon C.T., Gallagher B.L. Prospects for High Temperature Ferromagnetism in (Ga,Mn)As Semiconductors. Physical Review B. 2005. Vol. 72. 165204.
5. Dietl T. A Ten-Year Perspective on Dilute Magnetic Semiconductors and Oxides. Nature Materials. 2010. Vol. 9. P. 965–974.
6. Matsukura F., Ohno H., Dietl T. III–V Ferromagnetic Semiconductors. Handbook of Magnetic Materials. 2002. Vol. 14. P. 1–87.
7. Iye Y., Oiwa A., Endo A., Katsumoto S., Matsukura F., Shen A., Ohno H., Munekata H. Metal–Insulator Transition and Magnetotransport in III–V Compound Diluted Magnetic Semiconductors. Materials Science and Engineering: B. 1999. Vol. 63, No. 1–2. P. 88–95. DOI: 10.1016/S0921-5107(99)00057-4.
8. Sawicki M., Matsukura F., Idziaszek M., Dietl T., Schott G.M., Ruester C., Karczewski G., Schmidt G., Molenkamp L.W. Temperature Dependent Magnetic Anisotropy in (Ga,Mn)As Layers. 2002.

9. Koeder A., Frank S., Schoch W., Avrutin V., Limmer W., Thonke K., Sauer R., Krieger M., Zuern K., Ziemann P., Brotzmann S., Bracht H., Waag A. Curie Temperature and Carrier Concentration Gradients in MBE Grown GaMnAs Layers. 2002.
10. Edmonds K.W., Wang K.Y., Campion R.P., Neumann A.C., Farley N.R.S., Gallagher B.L., Foxon C.T. High Curie Temperature GaMnAs Obtained by Resistance-Monitored Annealing. 2002.
11. Sandratskii L.M., Bruno P. Exchange Interactions and Curie Temperature in (GaMn)As. 2002.
12. Sanvito S., Ordejón P., Hill N.A. First Principles Study of the Origin and Nature of Ferromagnetism in (Ga,Mn)As. 2000.
13. Yu K.M., Walukiewicz W., Wojtowicz T., Lim W.L., Liu X., Bindley I., Dobrowolska M., Furdyna J.K. Fundamental Curie Temperature Limit in Ferromagnetic GaMnAs. 2003.
14. Ben Hamida A., Liebing N., Serrano-Guisan S., Sievers S., Pierz K., Schumacher H.W. Magnetic and Transport Properties of As-Grown and Annealed GaMnAs Thick Layers. Journal of the Magnetic Society of Japan. 2012. Vol. 36. P. 49–53.
15. Abera G., et al. Effects of Manganese Concentration and Temperature on the Ferromagnetism of Manganese-Doped Gallium Arsenide Semiconductor. Nano Select. 2024. DOI: 10.1002/nano.202300084.