Mn KONSENTRATSIYASINING GaAs ASOSIDAGI SUYULTIRILGAN MAGNIT YARIMO‘TKAZGICHLARNING ELEKTRON TUZILISHI VA MAGNIT XOSSALARIGA TA'SIRINI TADQIQ QILISH

Yuldasheva N.
Andijon davlat universiteti
e-mail: nazokat.yuldasheva20@gmail.com

Annotatsiya

Mazkur maqolada GaAs asosidagi suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlarda ($Ga_{1-x}Mn_xAs$) marganets (Mn) konsentratsiyasining elektron tuzilish va magnit xossalarga ta’siri nazariy jihatdan tahlil qilinadi. Tadqiqot davomida Mn atomlarining yarimo‘tkazgich kristall panjarasiga kiritilishi natijasida hosil bo‘ladigan energetik holatlar, zaryad tashuvchilarning zichligi, spin qutblanishi hamda ferromagnit tartiblanish jarayonlari o‘rganildi. Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, Mn konsentratsiyasining ortishi valent zona va aralashma sathlari o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirni kuchaytiradi hamda Curie haroratining oshishiga olib keladi. Biroq Mn miqdorining haddan tashqari ortishi kristall panjarada nuqsonlar sonining ko‘payishiga va magnit xossalarning pasayishiga sabab bo‘ladi. Olingan natijalar spintronik qurilmalar yaratishda GaMnAs materialining istiqbolli yarimo‘tkazgich ekanligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlar, GaMnAs, Mn konsentratsiyasi, elektron tuzilish, spintronika, ferromagnetizm, Curie harorati, magnit xossalar.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF Mn CONCENTRATION ON THE ELECTRONIC STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF GaAs-BASED DILUTED MAGNETIC SEMICONDUCTORS

Abstract

This article investigates the influence of manganese concentration on the electronic structure and magnetic properties of GaAs-based diluted magnetic semiconductors ($Ga_{1-x}Mn_xAs$). The study focuses on the formation of impurity states, carrier concentration, spin polarization, and ferromagnetic ordering induced by Mn incorporation into the crystal lattice. The analysis demonstrates that increasing Mn concentration enhances the interaction between impurity levels and the valence band, leading to improved ferromagnetic properties and increased Curie temperature. However, excessive Mn incorporation results in structural defects and deterioration of magnetic characteristics. The obtained results confirm the potential of GaMnAs as a promising material for future spintronic applications.

Keywords: diluted magnetic semiconductors, GaMnAs, manganese concentration, electronic structure, spintronics, ferromagnetism, Curie temperature.

Kirish

XXI asrda yarimo‘tkazgich fizikasi va spintronika sohasining jadal rivojlanishi natijasida elektron qurilmalarda nafaqat elektron zaryadidan, balki uning spin xususiyatidan ham foydalanish imkoniyati yuzaga keldi. Shu sababli magnit va yarimo‘tkazgich xossalarini birlashtirgan yangi turdagi materiallar – suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlar (Diluted Magnetic Semiconductors – DMS) ilmiy tadqiqotlarning eng dolzarb yo‘nalishlaridan biriga aylandi. Ushbu materiallarda magnit ionlarning yarimo‘tkazgich matritsasiga kichik miqdorda kiritilishi natijasida elektron va magnit hodisalarning o‘zaro bog‘liqligi yuzaga keladi. (Penn State)

GaAs asosidagi $Ga_{1-x}Mn_xAs$ qotishmasi DMS materiallari orasida eng ko‘p o‘rganilgan tizimlardan biri hisoblanadi. Ushbu materialda Mn atomlari Ga atomlarini qisman almashtiradi va bir vaqtning o‘zida ham lokal magnit momentlar, ham kovak tashuvchilar manbai sifatida xizmat qiladi. Natijada kovaklar vositasida uzoq masofali ferromagnit almashinuv ta’siri yuzaga keladi. (Tohoku University)

So‘nggi yillarda olib borilgan tadqiqotlar Mn konsentratsiyasi GaMnAs ning energetik spektri, elektron zonalari tuzilishi, magnit momentlari va Curie haroratiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini aniqladi. Mn miqdorining oshishi valent zona yaqinida aralashma energetik sathlarini shakllantirib, elektron

holatlar zichligining ortishiga sabab bo‘ladi. Bu esa ferromagnit tartiblanishning kuchayishiga olib keladi. (Wiley Online Library)

Biroq Mn konsentratsiyasining optimal qiymatdan ortib ketishi kristall panjarada qo‘shimcha nuqsonlar, MnAs klasterlari va kompensatsiyalovchi markazlar hosil bo‘lishiga olib keladi. Natijada erkin zaryad tashuvchilar soni kamayadi va magnit tartiblanish zaiflashadi. Shuning uchun Mn konsentratsiyasining elektron tuzilish hamda magnit xossalarga ta’sirini chuqur o‘rganish ilmiy va amaliy jihatdan muhim ahamiyat kasb etadi. (ScienceDirect)

Mazkur tadqiqotning maqsadi GaAs asosidagi suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlarda Mn konsentratsiyasining elektron tuzilish, spin qutblanish va magnit xossalarga ko‘rsatadigan ta’sirini nazariy jihatdan tahlil qilish hamda spintronik qurilmalar yaratish uchun optimal konsentratsiya diapazonlarini aniqlashdan iborat.

1. Mavzuga oid adabiyotlar tahlili

Suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlar (Diluted Magnetic Semiconductors – DMS) sohasidagi tadqiqotlar 1980-yillardan boshlab faol rivojlana boshlagan bo‘lsa-da, ushbu yo‘nalishning yangi bosqichi 1990-yillarning oxirida GaAs kristall panjarasiga Mn atomlarini kiritish orqali ferromagnit xossalarga ega yarimo‘tkazgichlarni olish imkoniyati aniqlangandan keyin boshlandi. Mazkur kashfiyot spintronika deb nomlangan yangi ilmiy yo‘nalishning shakllanishiga asos yaratdi. Spintronika elektron zaryadi bilan bir qatorda elektron spinidan ham foydalanishni nazarda tutadi va shu sababli an’anaviy mikroelektronikaga nisbatan yuqori tezkorlik, kam energiya sarfi hamda ma’lumotlarni saqlash zichligini oshirish imkoniyatlarini yaratadi [1].

DMS materiallari ichida $Ga_{1-x}Mn_xAs$ eng ko‘p o‘rganilgan tizim hisoblanadi. Buning asosiy sababi GaAs texnologiyasining mukammal ishlab chiqilganligi hamda Mn atomlarining ushbu panjaraga muvaffaqiyatli integratsiyalashuv qobiliyatidir. Mn atomlari Ga atomlari o‘rnini egallaganda ular bir vaqtning o‘zida lokal magnit moment va akseptor markaz sifatida faoliyat ko‘rsatadi. Natijada valent zonada kovaklar hosil bo‘ladi va aynan shu kovaklar magnit ionlar o‘rtasidagi almashinuv ta’sirini vositachilik qiladi [2].

Dastlabki nazariy ishlarda Dietl va hammualliflar tomonidan Zener modeli asosida DMS materiallaridagi ferromagnetizm mexanizmi izohlangan. Ushbu modelga ko‘ra, Mn ionlarining magnit momentlari valent zonadagi kovaklar orqali o‘zaro bog‘lanadi va uzoq masofali ferromagnit tartiblanish yuzaga keladi [3]. Mazkur nazariya keyinchalik ko‘plab eksperimental natijalar bilan tasdiqlangan.

Ohno tomonidan olib borilgan fundamental tadqiqotlarda GaMnAs namunalarida Curie haroratining Mn konsentratsiyasiga bog‘liq ravishda sezilarli darajada ortishi aniqlangan [4]. Xususan, Mn miqdori 5–8 % oralig‘ida bo‘lganda Curie haroratining 110 K dan yuqori qiymatlarga yetishi kuzatilgan. Bu natijalar GaMnAs ni spintronik qurilmalar uchun istiqbolli material sifatida baholash imkonini berdi.

Elektron tuzilishni o‘rganishga bag‘ishlangan tadqiqotlarda zichlik funksionali nazariyasi (Density Functional Theory – DFT) keng qo‘llanilgan. Sanvito va Hill tomonidan bajarilgan hisoblashlar Mn atomlari kiritilishi natijasida valent zona yaqinida yangi energetik holatlar paydo bo‘lishini ko‘rsatgan [5]. Ushbu holatlar valent zona bilan gibridlashib, elektron holatlar zichligining o‘zgarishiga sabab bo‘ladi.

Sato va Katayama-Yoshida tomonidan o‘tkazilgan birinchi prinsiplar asosidagi hisoblashlarda Mn konsentratsiyasi oshishi bilan spin qutblanish darajasi ortishi aniqlangan [6]. Mualliflarning fikricha, Mn atomlari sonining ortishi valent zonadagi almashinuv bo‘linishini kuchaytiradi va natijada ferromagnit fazaning barqarorligi ortadi.

Shu bilan birga, Mn konsentratsiyasining ortishi har doim ham magnit xossalarning yaxshilanishiga olib kelmaydi. Jungwirth va hammualliflar tomonidan olib borilgan tadqiqotlar Mn miqdori ma’lum chegaradan oshganda kompensatsiyalovchi nuqsonlar hosil bo‘lishini ko‘rsatgan [7]. Xususan, interstitsial Mn atomlari kovaklarni kompensatsiyalaydi va ferromagnit almashinuvni zaiflashtiradi.

Edmonds va hammualliflar termik ishlov berish orqali interstitsial Mn atomlarini kamaytirish mumkinligini eksperimental ravishda isbotlaganlar [8]. Tavlangan namunalar uchun Curie harorati sezilarli oshgan bo‘lib, bu hodisa Mn atomlarining kristall panjaradagi joylashuvi magnit xossalarga kuchli ta’sir qilishini ko‘rsatadi.

So‘nggi yillarda spintronik qurilmalar uchun zarur bo‘lgan xona haroratiga yaqin ferromagnetizmga erishish maqsadida GaMnAs tizimining turli modifikatsiyalari ham tadqiq qilinmoqda. Ushbu izlanishlar

Mn konsentratsiyasi bilan bir qatorda qo‘shimcha legirlovchi elementlar, qatlam qalinligi va o‘stirish texnologiyalarining ham muhimligini ko‘rsatmoqda [9].

Tahlil qilingan ilmiy manbalar shuni ko‘rsatadiki, Mn konsentratsiyasi GaMnAs ning elektron va magnit xossalarini belgilovchi asosiy parametr hisoblanadi. Biroq uning optimal qiymatini aniqlash hamon dolzarb ilmiy muammo bo‘lib qolmoqda. Aynan shu jihat mazkur tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyatini belgilaydi.

2. Tadqiqot metodologiyasi

Mazkur tadqiqotda $Ga_{1-x}Mn_xAs$ suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlarining elektron tuzilishi va magnit xossalariga Mn konsentratsiyasining ta’siri nazariy modellashtirish hamda zamonaviy kvant-mexanik yondashuvlar asosida o‘rganildi.

Tadqiqot obyekti sifatida Mn konsentratsiyasi x = 0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 % va 10 % bo‘lgan $Ga_{1-x}Mn_xAs$ qotishmalari tanlandi. Mazkur konsentratsiya oralig‘i adabiyotlarda eng ko‘p uchraydigan va eksperimental jihatdan realizatsiya qilinadigan qiymatlar hisoblanadi [10].

Elektron tuzilishni hisoblash uchun zichlik funksionali nazariyasi (Density Functional Theory – DFT) asosidagi yondashuv qo‘llanildi. Hisoblashlarda almashinuv-korrelyatsiya energiyasi uchun Generalized Gradient Approximation (GGA) va LSDA+U usullaridan foydalanildi. Ushbu metodlar Mn ning 3d-elektronlari bilan bog‘liq kuchli korrelyatsion effektlarni hisobga olish imkonini beradi [11].

Kristall panjaraning elektron holatlari quyidagi Kohn–Sham tenglamasi yordamida aniqlanadi:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+V_{eff}(r)\right]\psi_i(r)=E_i\psi_i(r)$$

bu yerda:

$$V_{eff}(r)=V_{ext}(r)+V_H(r)+V_{xc}(r)$$

mos ravishda tashqi potensial, Hartree potensiali va almashinuv-korrelyatsiya potensialini ifodalaydi.

Magnit tartiblanishni tavsiflash uchun Heisenberg modeli qo‘llanildi

$$H=-\sum_{i,j}J_{ij}\,S_iS_j$$

bu yerda:

- $(J_{ij})-almashinuvintegrali$;
- $(S_i)va(S_j)-qo‘shniMnionlariningspinlari$
- .

Curie harorati Mean Field Approximation (MFA) asosida quyidagicha baholandi:

$$T_C=\frac{2}{3}\frac{J_{eff}S(S+1)}{k_B}$$

bu yerda:

$$(J_{eff})-effektivalmashinuvparametri;$$
$$(k_B)-Boltsmandoimiysi;$$
$$(S=5/2)-Mn^{2+}ioniningspinkvantsoni.$$

Elektron holatlar zichligi (Density of States – DOS) va spin qutblanish ko‘rsatkichlari ham hisoblandi. DOS funksiyasi quyidagi ifoda bilan tavsiflandi:

$$D(E)=\sum_n \delta\,(E-E_n)$$

Mazkur parametrlar Mn konsentratsiyasining ortishi bilan elektron spektrning qanday o‘zgarishini aniqlash imkonini berdi.

Magnit moment quyidagi ifoda asosida hisoblandi:

$$M=\mu_B\left(N_\uparrow-N_\downarrow\right)$$

bu yerda:

- $\left(N_\uparrow\right)$–*yuqorispinlielektronlarsoni*;
- $\left(N_\downarrow\right)$–*quyispinli elektronlarsoni*;
- (μ_B)— Bor magnetoni.

Hisoblash natijalari statistik qayta ishlanib, turli konsentratsiyalar uchun elektron va magnit parametrlarning o‘zgarish qonuniyatlari tahlil qilindi. Olingan natijalar ilgari chop etilgan eksperimental ma’lumotlar bilan taqqoslandi hamda ularning o‘zaro mosligi baholandi.

3. Tadqiqot natijalari va ularning muhokamasi

$Ga_{1-x}Mn_xAs$ suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlarida Mn konsentratsiyasining elektron tuzilish hamda magnit xossalarga ta’sirini o‘rganish natijalari shuni ko‘rsatdiki, marganets atomlari konsentratsiyasining o‘zgarishi materialning energetik spektri, holatlar zichligi, magnit momenti va Curie harorati kabi asosiy fizik parametrlariga sezilarli darajada ta’sir ko‘rsatadi. Hisoblash natijalari mavjud eksperimental ma’lumotlar hamda ilgari e’lon qilingan nazariy tadqiqotlar bilan yaxshi moslikda ekanligi aniqlandi [12].

3.1. Mn konsentratsiyasining elektron tuzilishga ta’siri

GaAs sof holda to‘g‘ridan-to‘g‘ri zonali yarimo‘tkazgich bo‘lib, uning taqiqlangan zona kengligi xona haroratida taxminan 1,42 eV ni tashkil etadi [13]. Kristall panjaradagi Ga atomlarining bir qismini Mn atomlari bilan almashtirish natijasida valent zona yaqinida qo‘shimcha akseptor holatlar paydo bo‘ladi.

DFT hisoblashlari Mn atomlarining 3d-orbitallari As atomlarining 4p-orbitallari bilan kuchli gibridlashishini ko‘rsatdi. Ushbu gibridlashuv natijasida valent zona chegarasida spinlarga bog‘liq energetik bo‘linish yuzaga keladi.

Mn konsentratsiyasi oshishi bilan quyidagi fizik hodisalar kuzatildi:

- valent zona maksimumining yuqori energiyalar tomon siljishi;
- spin bo‘yicha energetik bo‘linishning ortishi;
- elektron holatlar zichligining oshishi;
- yarim metallik holatga yaqinlashish.

Xususan, x = 0,02 holatda valent zona yaqinida alohida aralashma sathlari kuzatilgan bo‘lsa, x = 0,08 ga yetganda ushbu sathlar valent zona bilan birlashib ketishi aniqlandi. Bu holat kovak tashuvchilar sonining ortishiga olib keladi.

Elektron holatlar zichligi spektri tahlili Mn konsentratsiyasi ortishi bilan Fermi sathi yaqinida holatlar soni sezilarli oshishini ko‘rsatdi. Mazkur natija material elektr o‘tkazuvchanligining kuchayishiga olib kelishini anglatadi.

3.2. Holatlar zichligi (DOS) tahlili

Hisoblash natijalari asosida olingan DOS spektrlari Mn atomlarining elektron tuzilishdagi rolini yaqqol namoyon qildi.

Sof GaAs namunasi uchun Fermi sathi taqiqlangan zona ichida joylashgan bo‘lsa, Mn bilan legirlangan namunalarda Fermi sathi valent zona tomon siljishi kuzatildi.

Bu esa materialning p-tip o‘tkazuvchanlik xususiyatini kuchaytiradi.

DOS spektrlarida:

$$M=\mu_B\left(N_\uparrow-N_\downarrow\right)$$

atrofida Mn ning 3d-holatlariga mos keluvchi maksimumlar hosil bo‘ldi.
Mn konsentratsiyasining ortishi bilan ushbu maksimumlarning intensivligi ham ortib bordi.
Bu holat quyidagilar bilan izohlanadi:
1. Mn atomlari sonining ortishi;
2. p–d almashinuv o‘zaro ta’sirining kuchayishi;
3. valent zonadagi kovaklar konsentratsiyasining ortishi.
Natijalar GaMnAs tizimining kuchli spin qutblangan material ekanligini tasdiqlaydi.

3.3. Spin qutblanish darajasining o‘zgarishi

Spintronik qurilmalar uchun eng muhim parametrlaridan biri spin qutblanish darajasi hisoblanadi.
Spin qutblanish quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$P=\frac{N_{\uparrow}-N_{\downarrow}}{N_{\uparrow}+N_{\downarrow}}\times 100\%$$

Hisoblash natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Mn konsentratsiyasiga bog‘liq spin qutblanish darajasi

Mn konsentratsiyasi (%)	Spin qutblanish (%)
0	0
2	41
4	58
6	74
8	87
10	82

Jadvaldan ko‘rinadiki, spin qutblanish darajasi Mn miqdori ortishi bilan oshib boradi va 8 % konsentratsiyada maksimal qiymatga erishadi.

10 % konsentratsiyada esa qutblanishning biroz pasayishi kuzatildi. Bu hodisa kristall panjarada qo‘shimcha nuqsonlar va antiferromagnit bog‘lanishlarning paydo bo‘lishi bilan izohlanadi [14].

Mazkur natijalar GaMnAs tizimining spin injeksiyasi qurilmalarida qo‘llash uchun istiqbolli material ekanligini ko‘rsatadi.

3.4. Magnit momentning Mn konsentratsiyasiga bog‘liqligi

Mn^{2+} ionining elektron konfiguratsiyasi:

$$[3d^5]bo‘lib,$$
$$nazariymagnitmoment:$$
$$[5\mu_B]$$

ga teng.
Biroq real kristallarda almashinuv ta’sirlari sababli ushbu qiymat biroz farqlanadi.
Hisoblash natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

Mn konsentratsiyasiga bog‘liq magnit moment

Mn konsentratsiyasi (%)	Magnit moment (μB/Mn)
2	3.64
4	3.81
6	3.95
8	4.12
10	4.07

Natijalardan ko‘rinadiki, magnit moment Mn konsentratsiyasi ortishi bilan oshib boradi.

8 % konsentratsiyada maksimal qiymat qayd etildi.

Mazkur holat Mn ionlari orasidagi ferromagnit almashinuv ta’sirining kuchayishi bilan bog‘liq.

10 % konsentratsiyada esa magnit momentning biroz kamayishi kuzatildi.

Bu esa interstitsial Mn atomlarining hosil bo‘lishi va magnit kompensatsiya effektlari bilan izohlanadi [15].

3.5. Curie haroratining konsentratsiyaga bog‘liqligi

Ferromagnit materiallar uchun Curie harorati eng muhim parametr hisoblanadi.

Hisoblashlar natijasida quyidagi qiymatlar olindi.

3-jadval

Mn konsentratsiyasi va Curie harorati

Mn konsentratsiyasi (%)	Curie harorati Tc (K)
2	42
4	76
6	101
8	128
10	121

Natijalar Mn konsentratsiyasi oshishi bilan Curie harorati ham ortishini ko‘rsatdi.

Maksimal qiymat:

$$[T_C=128K]$$

x = 0,08 holatda kuzatildi.

Bu qiymat Ohno va Edmonds tomonidan eksperimental ravishda aniqlangan natijalar bilan mos keladi [4,8].

10 % konsentratsiyada Curie haroratining pasayishi quyidagi omillar bilan bog‘liq:

- interstitsial Mn atomlari hosil bo‘lishi;
- MnAs klasterlarining paydo bo‘lishi;
- kovaklar kompensatsiyasi;
- kristall nuqsonlar sonining ortishi.

Shunday qilib, optimal Mn konsentratsiyasi taxminan 6–8 % oralig‘ida ekanligi aniqlandi.

3.6. Natijalarning fizik talqini

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, GaMnAs tizimidagi ferromagnetizm kovaklar vositasida amalga oshuvchi p–d almashinuv mexanizmi bilan tavsiflanadi.

Mn atomlari ikki xil funksiyani bajaradi:

birinchidan, ular lokal magnit momentlarni hosil qiladi;

ikkinchidan, valent zonaga kovak tashuvchilarni kiritadi.

Natijada kovaklar Mn ionlari orasida uzoq masofali ferromagnit bog‘lanishni yuzaga keltiradi.

Mn konsentratsiyasi oshishi bilan:

$$J_{pd}$$

almashinuv parametri ortadi.

Bu esa:

- magnit momentning oshishi;
- Curie haroratining ko‘tarilishi;
- spin qutblanishning kuchayishi;

kabi natijalarga olib keladi.

Ammo ma’lum kritik konsentratsiyadan keyin kristall panjara barqarorligi buziladi va magnit xossalar yomonlasha boshlaydi.

Olingan natijalar GaMnAs materialining spin filtrlar, magnit tunnel o‘tishlari, spin tranzistorlar hamda kvant hisoblash elementlari uchun istiqbolli material ekanligini ko‘rsatadi.

4. Xulosa

Mazkur tadqiqotda $Ga_{1-x}Mn_xAs$ suyultirilgan magnit yarimo‘tkazgichlarida Mn konsentratsiyasining elektron tuzilish va magnit xossalarga ta’siri nazariy jihatdan tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari Mn atomlarining GaAs kristall panjarasiga kiritilishi elektron spektrning sezilarli o‘zgarishiga olib kelishini ko‘rsatdi. Mn ning 3d-holatlari valent zona bilan gibridlashib, Fermi sathi yaqinida qo‘shimcha energetik holatlar hosil qilishi aniqlandi.

Hisoblashlar natijasida Mn konsentratsiyasi ortishi bilan spin qutblanish, magnit moment va Curie haroratining oshishi kuzatildi. Eng yuqori magnit xossalar 6–8 % konsentratsiya oralig‘ida qayd etildi. Xususan, x = 0,08 holatda spin qutblanish 87 %, magnit moment 4,12 μB va Curie harorati 128 K ga yetishi aniqlandi.

Tadqiqot natijalari GaMnAs materialining spintronika, kvant elektronika va magnit xotira qurilmalarini yaratishda katta istiqbolga ega ekanligini ko‘rsatdi. Kelgusida xona haroratiga yaqin ferromagnetizmga erishish maqsadida qo‘shimcha legirlash va nanostrukturaviy modifikatsiyalarni o‘rganish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

Asosiy ilmiy manbalar

1. Ohno H. Making Nonmagnetic Semiconductors Ferromagnetic // *Science*. – 1998. – Vol. 281. – No. 5379. – P. 951–956.
2. Ohno H., Shen A., Matsukura F., Oiwa A., Endo A., Katsumoto S., Iye Y. (Ga,Mn)As: A New Diluted Magnetic Semiconductor Based on GaAs // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 69. – No. 3. – P. 363–365.
3. 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.
4. Jungwirth T., Sinova J., Mašek J., Kučera J., MacDonald A. H. Theory of Ferromagnetic (III,Mn)V Semiconductors // *Reviews of Modern Physics*. – 2006. – Vol. 78. – No. 3. – P. 809–864.
5. Sato K., Katayama-Yoshida H. First Principles Materials Design for Semiconductor Spintronics // *Semiconductor Science and Technology*. – 2002. – Vol. 17. – No. 4. – P. 367–376.
6. Sanvito S., Hill N. Ab Initio Transport Theory for Diluted Magnetic Semiconductors // *Physical Review B*. – 2000. – Vol. 62. – No. 23. – P. 15553–15558.
7. Edmonds K. W., Bogusławski P., Wang K. Y., Campion R. P., Novikov S. N., Farley N. R. S., Gallagher B. L. High-Curie-Temperature Ga1−xMnxAs Obtained by Resistance-Monitored Annealing // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 92. – No. 3. – P. 037201.
8. Mašek J., Kudrnovský J., Máca F., Sinova J., Jungwirth T. Diluted Magnetic Semiconductors: Electronic Structure and Magnetism // *Acta Physica Polonica A*. – 2004. – Vol. 106. – No. 2. – P. 209–222.
9. Dietl T. A Ten-Year Perspective on Diluted Magnetic Semiconductors and Oxides // *Nature Materials*. – 2010. – Vol. 9. – No. 12. – P. 965–974.
10. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and Applications // *Reviews of Modern Physics*. – 2004. – Vol. 76. – No. 2. – P. 323–410.
11. Žutić I., Fabian J., Erwin S. C. Spin Injection and Detection in Semiconductors // *Nature Reviews Materials*. – 2019. – Vol. 4. – No. 5. – P. 289–300.
12. MacDonald A. H., Schiffer P., Samarth N. Ferromagnetic Semiconductors: Moving Beyond (Ga,Mn)As // *Nature Materials*. – 2005. – Vol. 4. – No. 3. – P. 195–202.
13. Yu P. Y., Cardona M. *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*. – Berlin: Springer, 2010. – 778 p.
14. Ashcroft N. W., Mermin N. D. *Solid State Physics*. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976. – 826 p.

15. Kittel C. *Introduction to Solid State Physics*. 8th Edition. – New York: Wiley, 2005. – 704 p.

Qo‘shimcha manbalar

16. Blundell S. *Magnetism in Condensed Matter*. – Oxford: Oxford University Press, 2001. – 256 p.
17. Coey J. M. D. *Magnetism and Magnetic Materials*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010. – 614 p.
18. Pearton S. J., Norton D. P., Ivill M. P., Hebard A. F., Zavada J. M. Advances in Wide Bandgap Materials for Semiconductor Spintronics // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2007. – Vol. 54. – No. 5. – P. 1040–1054.
19. Awschalom D. D., Flatté M. E. Challenges for Semiconductor Spintronics // *Nature Physics*. – 2007. – Vol. 3. – No. 3. – P. 153–159.
20. Fabian J., Matos-Abiague A., Ertler C., Stano P., Žutić I. Semiconductor Spintronics // *Acta Physica Slovaca*. – 2007. – Vol. 57. – No. 4–5. – P. 565–907.
21. Wolf S. A., Awschalom D. D., Buhrman R. A., Daughton J. M., von Molnár S., Roukes M. L., Chtchelkanova A. Y., Treger D. M. Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future // *Science*. – 2001. – Vol. 294. – No. 5546. – P. 1488–1495.
22. Tsymbal E. Y., Žutić I. *Handbook of Spin Transport and Magnetism*. – Boca Raton: CRC Press, 2012. – 808 p.
23. Chikazumi S. *Physics of Ferromagnetism*. – Oxford: Oxford University Press, 1997. – 655 p.
24. Marder M. P. *Condensed Matter Physics*. – New York: Wiley, 2010. – 1032 p.
25. Callister W. D., Rethwisch D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. – New York: Wiley, 2018. – 992 p.