

UOT 537.611.44; 544.163

GaSb-Fe₃Ga₄ EVTEKTİK KOMPOZİTİN MAQNİT XASSƏLƏRİ

I.X.MƏMMƏDOV¹, K.I.YANUŞKEVİÇ², D.H.ARASLI³, R.N.RƏHİMOV³, A.A.XƏLİLOVA³

Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası¹

AZ 1045, Bakı, Mərdəkan pr., 30

Belarus MEA-nın materialşünaslıq üzrə Elmi-praktik mərkəzi²

220072, Belarus, Minsk, P.Brovki küç.,19

Azərbaycan MEA Fizika İnstitutu³

AZ 1143, Bakı, H.Cavid küç., 131

Daxil olub: 14.01.2021
Çapa verilib: 25.02.2021

REFERAT

Çox komponentli maqnit və yarımqeçirici xassəli GaSb-Fe₃Ga₄ evtektik kompozit sintez olunub. Müxtəlif temperaturlarda rentgen analizi ilə sistemin iki fazalığı göstərilmiş, matrisin, metal qatqıların və fazalar arası zonaların element tərkibi müəyyən edilib. Xüsusi maqnitlənmə və maqnit qavrayıcılıq xüsusiyyətləri 80-750K temperatur aralığında 0.86Tl maqnit sahəsində ponderomotor metodu ilə, 4.6K və 295K temperaturda isə B=±14Tl induksiya qədər maqnit sahəsində vibrasiya metodu ilə öyrənilib. GaSb-Fe₃Ga₄ evtektik kompozit üçün Küri temperaturu T_c=355K müəyyən olunub. Maye azot temperaturunda kompozitin xüsusi maqnitlənməsi $\sigma=1,5A\ m^{-2}\ kg^{-1}$ və maqnit momentin orta qiyəti $\mu=0,17\mu_B$ olduğu müəyyən olunub. Kompozitin maqnit xüsusiyyətlərinin 750K-temperaturadək istiliyə və 14Tl xarici maqnit sahəsinə davamlı olduğu göstərilib.

Açar sözlər: evtektik kompozit, element tərkibi, xüsusi maqnitlənmə, maqnit qavrayıcılığı.

GİRİŞ

III-V qrup birləşmələri 3d-keçid metallarının müəyyən konsentrasiyasında evtektik birləşmələr əmələ gətirdiyi məlumdur [1]. Bu cür kompozitlər III-V qrup elementlərdən ibarət matrisdən və 3d elementlərdən ibarət klasterlər şəklində maqnit qatqılardan təşkil olunmuş yarımqeçiricilərdir. Bərabər paylanmış maqnit qatqılar evtektik kompozitlərdə özünəməxsus xüsusiyyətlər yaradır. Bunların əsasında qalvano-termomaqnit, fototermomaqnit, optik və tenzo sensorlar yaradılıb [2-13]. Belə maddələrin aktuallığı spintronik cihazlarda matris elementləri yaratmaq üçün maqnit qatqıların ölçüsünü və konsentrasiyasını dəyişərək xüsusiyyətləri idarə olunan yeni çoxfunksiyalı materiallara tələbatın artması ilə əlaqədardır [14-17].

Perspektivli maqnit yarımqeçirici materiallardan biri GaSb-Fe₃Ga₄ evtektik kompozitidir. Fe₃Ga₄ birləşmənin xüsusiyyətləri elmi ədəbiyyatda geniş tədqiq olunub [18-26]. Əvvəlki işimiz

GaSb-Fe₃Ga₄ evtektik kompozitin sintezinə, elektrik və istilik xüsusiyyətlərinə həsr olunub [8-10]. Kinetik əmsallar müəyyən edilib, elektron və fonon proseslərin xüsusiyyətləri aşkar olunub, onların əsasında termostabil və xətti xüsusiyyətlərə malik histerezissiz tenzomüqavimətlər yaradılıb [12]. GaSb-Fe₃Ga₄ evtektik kompozitin praktiki tətbiqləri üçün vacib olan xüsusiyyətlər sırasında maqnit xassələri barədə məlumat yoxdur. Bu işin məqsədi geniş temperatur aralığında GaSb-Fe₃Ga₄ evtektik kompozitin maqnit xüsusiyyətlərini və xarici maqnit sahələrinin təsirini öyrənməkdir.

EKSPERİMENTİN APARILMASI

Qallium (QI-000 markalı) və sürmə (Cy-000 markalı) elementləri stexiometrik tərkibdə standart üsulla birləşdirilmiş, zona əritisi ilə 30 dəfə təkrar kristallaşma aparılaraq $4 \cdot 10^7\ cm^{-3}$ konsentrasiyalı, p-tip keçiriciliyi olan GaSb birləşməsi alınıb. GaSb-Fe₃Ga₄ kompoziti almaq üçün GaSb

birləşməsinə Fe_3Ga_4 formuluna uyğun olaraq 3kütlə %Fe ($\text{Fe}_3\text{N}-99,9$) əlavə olunmuş və şaquli Bridgman üsulu ilə $1,0\text{mm}^2/\text{daq}$ kristallaşma sürəti ilə sintez edilmiş. Alınmış kompozitdə yükdəyiçicilərin konsentrasiyası $p=1,2 \cdot 10^{18}\text{sm}^{-3}$ olmuşdur.

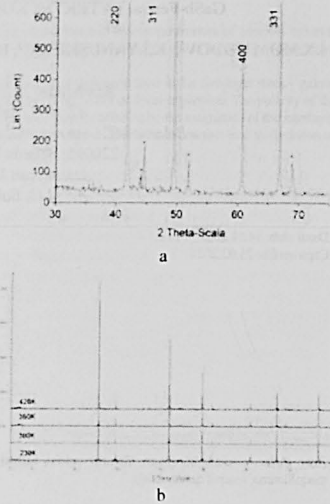
"Broker Advance-D8" difraktometridə 230, 300, 350 və 420K temperaturalarda alınmış difraktoqramlar TOPAZ və EVA proqramı ilə araşdırılıb. $\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ kompozitin mikrostrukturunu və səthin morfologiyasını Philips markalı elektron mikroskopunda 3kV-luq sürətləndirici gərginlikdə, element tərkibi isə "EDX model EDAX1M" rentgen spektroskopunda 15kV-luq gərginlikdə öyrənilib. $\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ eutektik birləşmənin xüsusi maqnitləşməsi $-80-750\text{K}$ temperatur aralığında ponderomotor üsulla ölçülüb. Xüsusi maqnitlənmə və maqnit qavrayıcılığı $4,6\text{K}$ və 295K temperaturda və $B=14\text{T}$ qədər maqnit sahəsində vibrasiya metodu ilə öyrənilib. Ponderomotor metodu ilə xüsusi maqnitlənmə ölçülərində yol verilən xəta $\pm 0,05\text{A m}^{-2}\text{kg}^{-1}$ və tərkibin vahid kütləsinə düşən maqnit qavrayıcılığı $\pm 10^{-11}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$ təşkil edir.

Qurğunun termostati nümunəni -80K -dən 1400K -ə qədər temperatur aralığında davamlı ölçmə şəraitində $\chi(T)$ və $\sigma(T)$ asılılıqları öyrənməyə imkan verir. Nümunələrin maqnitlənməsi maqnit sahəsinin metal qatlıqlara perpendikulyar və paralel yönəlmis istiqamətində ölçülüb. $4,6$ və 295K temperaturda xüsusi maqnitlənmə (σ) induksiya $\pm 14\text{T}$ qədər olan maqnit sahəsində tədqiq olunub.

EKSPERİMENTİN NƏTİCƏLƏRİ VƏ MÜZAKİRƏSİ

$\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ eutektik kompozitin nümunələrində müxtəlif temperaturalarda çəkilmiş difraktoqramlar 1-ci Şəkilə göstərilib. 300K temperaturda yüksək intensivlikli reflekslər GaSb birləşməsinə, ulduzla işarələnmiş zəif reflekslər Fe_3Ga_4 birləşməsinə uyğundur. Fərqli temperaturalarda alınan difraktoqramlarla (Şəkil 1b) və mikrostruktur tədqiqatları ilə $\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ kompozitin iki fazlılığı təsdiqlənib (Şəkil 2). SEM şəkilləri Fe_3Ga_4 qatlıqlarını

yönəlmis "iyələr" şəklində GaSb matrisində kifayət qədər bərabər paylanmasını göstərir.



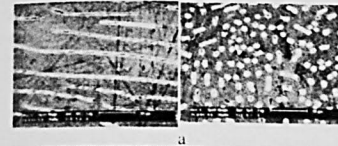
Şəkil 1

$\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ eutektik kompozitin: a) 300K temperaturda, b) 230K , 300K , 350K , 420K temperaturlarında müqayisəli rentgen difraktoqramları.

Fe_3Ga_4 iyələrin eninə ölçüləri $\sim 1-1,5\mu\text{m}$, uzunluğu $20-150\mu\text{m}$ arasında dəyişir, sıxlığı $\sim 3,3 \cdot 10^{14}\text{mm}^{-2}$ -dir (Şəkil 2a). Qatlıqların ətrafında fazalar arası zonanın olduğunu SEM şəkilləri aydın şəkildə göstərir. Matrisin, qatlıqların və fazalar arası zonaların element tərkibi Şəkil 2(b,c,d)-də göstərilib. Matrisdəki qallium və sürmə elementlərin miqdarı GaSb birləşmənin stexiometrik tərkibinə uyğundur. Qatlıqlarda dəmir və qallium elementləri ilə yanaşı az miqdarda (təxminən $3,4\%$) sürmənin və interfeys zonasında matris elementləri ilə yanaşı təxminən $16,5\%$ çəki% dəmir olduğu aşkar edilib.

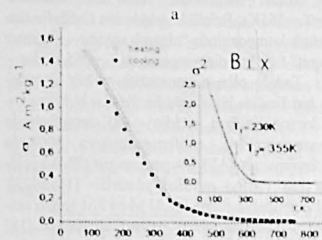
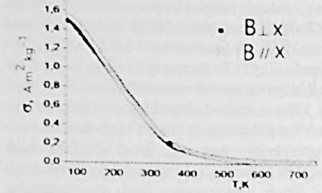
$80-750\text{K}$ temperatur aralığında və $B=0,86\text{T}$ maqnit sahəsində $\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ kompozitin xüsusi maqnitlənmə $\sigma=f(T)$ maqnit sahəsinin qatlıqları

perpendikulyar və paralel istiqamətində araşdırılıb (Şəkil 3a).



Şəkil 2

Elektron mikroskopunda metal qatlıqların (a) perpendikulyar və paralel düzülüşü, (b) matrisdə, (c) qatlıqlarda və (d) fazalar arası zonada EDAX metodu ilə təyin olunmuş element tərkibi.



Şəkil 3

$\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ eutektik kompozitdə xüsusi maqnitlənmənin temperatur asılılığı: a) maqnit sahəsinin metal qatlıqlara perpendikulyar və paralel istiqamətində, b) $80-750\text{K}$ temperaturda və $B_{\parallel X}$ maqnit sahəsində $\sigma=f(T)$ asılılığın qızma və soyuma ayrılması.

Maqnit sahəsinin metal qatlıqlarını hər iki istiqamətində $\sigma=f(T)$ asılılıqları eynidir. Belə təcrübə nəticə xarici maqnit sahəsinin hər iki istiqamətində $\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ eutektikada heç bir anizotropiyanın olmadığını göstərir. Xüsusi maqnitlənmə demək olar ki, xətti olaraq $1,5\text{Am}^2/\text{kg}$ -dan $0,2\text{Am}^2/\text{kg}$ -a qədər azalır. Qızma və soyuma zamanı $\sigma=f(T)$ asılılıqda histerezis müşahidə olunmur. Eksperimental olaraq müəyyən edilmiş bu fakt tədqiq olunan kompozitin göstərilən temperatur aralığında maqnit xüsusiyyətlərinin geri dönməz olduğunu göstərir.

Şəkil 3b-də $\sigma=f(T)$ asılılığı verilib və bu asılılıqdan Kuri temperaturunu (T_C) təyin olunub. Klassik Fe, Co, Ni ferromaqnit üçlüyün $\sigma=f(T)$ asılılığında yalnız bir ayılma müşahidə olunur. $\text{GaSb-Fe}_3\text{Ga}_4$ kompozitin $\sigma=f(T)$ asılılığında isə iki anomaliya var: $T_{C1}=230\text{K}$ və $T_{C2}=355\text{K}$. Göründüyü kimi $80\text{K} \leq T \leq T_1$ temperatur aralığı

uzaq maqnit nizamlılığın mövcud olduğu, $T_2 < T < 750K$ temperatur aralığı isə yaxın maqnit nizamlılığın və paramaqnit halın baş verdiyi bölgədir, $T_1 < T < T_c$ temperatur aralığı isə, çox ehtimal ki, yaxın maqnit nizamlılığa keçid bölgəsidir.

Yaxın maqnit nizamlılığın saxlanması "nizamlı maqnit-nizamsız maqnit" faza keçid temperaturu genişlənməsi onun ikinci növ faza keçidi olduğunu göstərir. Çox ehtimal ki, T_2 həm də tədqiq olunan nümunənin Kürri temperaturudur ($T_2 = T_c = 355K$). Beləliklə araşdırılan GaSb-Fe₃Ga evtektik kompozitində "nizamlı maqnit - nizamsız maqnit" faza keçidinin temperaturu $T_c = 355K$ olur.

Tədqiq olunan kompozitin tərkib hissəsindən biri Fe₃Ga birləşməsidir. Fe₃Ga birləşməsində iki maqnit faza keçidini - 68K temperaturda ferromaqnit (FM) - antiferromaqnit və ~360K-da antiferromaqnit (AFM) - paramaqnit (PM) keçidlərin baş verdiyi əvvəllər göstərilib [18,20,23]. Aralıq temperaturlarda isə AFM və FM halları arasında qarşılıqlı əlaqələrin mübadiləsi yaranır. [18] işin müəllifləri müşahidə olunan keçidlərin Fe₃Ga birləşməsində kristal quruluşun xüsusiyyətləri ilə əlaqəli olduğunu göstərirlər. Fe₃Ga elementar kristal özəyi maqnit momentləri və yükdaşıyıcıların xüsusiyyətləri müxtəlif olan və dörd qeyri-bərabər mövqə tutan on səkkiz damir atomundan təşkil olunub. Fe₃Ga birləşməsinin maqnit xüsusiyyətlərinə tablamanın əhəmiyyətli dərəcədə təsir etdiyi aşkar olunub. Məlumdur ki, kristaldakı nizamsızlıq FM və AFM halların birgə mövcudluğun xüsusiyyətlərini müəyyən edir [18]. [19] işdə Fe₃Ga birləşməsinin maqnit xüsusiyyətlərinə həndəsi ölçülərin təsir öyrənilib. Həcmi kristallarda olduğu kimi nanoməftillərdə də iki maqnit faza keçidi və həm də FM və AFM fazaların birgə mövcudluğu müşahidə olunub. Fe₃Ga matrisində ⁵⁷Fe nüvəsində Mössbauer effektinin yaranma xüsusiyyətləri tədqiq olunarkən kritik temperatur $T_3 = 392K$ müəyyən edilib. GaSb-Fe₃Ga kompozitdə müşahidə etdiyimiz maqnit faza keçidinin temperaturu (355K, Şəkil 3) Fe₃Ga birləşməsinin AFM-PM keçid temperaturuna yaxındır [23]. Fe₃Ga birləşməsində maqnit araşdırmaların nəticələri [22-23] işlərdə verilən bilgilərə uyğun gəlir və maqnit anizotropluğu olmadığı halda elektron sistemlərdə maqnit faza keçidləri üçün Mariya və Usami modeli [24] istifadə olunaraq şərh edilə bilər. GaSb-Fe₃Ga evtektik

kompozitdə xüsusi maqnitlənmə üçün verilən eksperimental nəticələr (Şəkil 3a) maqnit anizotropluğun yoxluğunu göstərir. Mariya və Usami modelində ferromaqnit (MO) və antiferromaqnit (MQ) komponentlərdə maqnit qavrayıcılığın temperatur funksiyası kimi qəbul olunur, maqnit anizotropluğu olmadığı halda bir-birinə bağlı elektronlar üçün qarşılıqlı təsirin mübadilə enerjisi aşağıdakı kimi hesablanır:

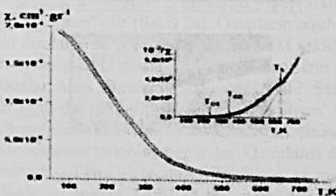
$$F(M_0, M_0', T) = \frac{1}{2x_0} M_0^2 + \frac{1}{2x_0} M_0'^2 + \frac{1}{4} \gamma_1 M_0^2 + \frac{1}{4} \gamma_2 M_0'^2 + \frac{1}{2} \gamma_{12} M_0 M_0' + \frac{1}{2} \gamma_{12}' M_0 M_0' - H_0 M_0$$

burada

$$\frac{1}{x_0} = \left(\frac{1}{x_0'} \right) - 1 + (\theta^2 \Delta F / 2M_0^2), \quad \frac{1}{x_0'} = \left(\frac{1}{x_0''} \right) - 1 + (\theta^2 \Delta F' / 2M_0'^2)$$

H_0 -bircinsli maqnit sahənin intensivliyidir. x_0^0 , x_0^1 , γ_1 , γ_2 , γ_{12} - əmsalları hər hansı bir zona quruluşu üçün hesablanır. Qarşılıqlı təsirin mübadilə enerjisi ΔF və dinamik maqnit qavrayıcılığın yaxınlaşma metodundan istifadə olunaraq hesablanır [2,3].

GaSb-Fe₃Ga evtektikasında anizotropluğu olmadığı halda zəif maqnit qarşılıqlı təsirdə qavrayıcılığın hesablanması qiyməti $\chi = 2.3 \cdot 10^{-4}$ olur. $B = 0.86T$ induksiya statik maqnit sahəsində və 80K-də ponderomotor metodu ilə ölçülən maqnit qavrayıcılığın $\chi = 1.9 \cdot 10^{-4}$ qiymətini alır (Şəkil 4).



Şəkil 4

80-750K temperatur aralığında GaSb-Fe₃Ga üçün maqnit qavrayıcılığın $\chi(T)$ temperatur asılılığı. Şəkilin kəməndə $10^2/\chi(T)$ asılılığı.

Maqnit qavrayıcılığın hesablanması və ölçülərin qiymətləri eyni tərtibdədir. 4a Şəkilə maqnit qavrayıcılığın tərs qiymətinin temperaturdan asılılığı $10^2/\chi(T)$ verilib. $10^2/\chi(T)$ asılılığı T_3 temperaturda yaxın maqnit nizamın sona çatmasına və maqnit nizamsızlığa tam keçidi göstərir. $T_3 = 650K$ temperaturdan yuxarıda maqnit qavrayıcılığı xətti dəyişir. $10^2/\chi(T)$ asılığın düz xətti hissəsinin T oxuna proyeksiyası temperaturun müsbət bölgəsinə düşür və bu 80K-də xüsusi maqnitlənmə $\sigma = 1.5Am^2kr^{-1}$ bərabər olan GaSb-Fe₃Ga evtektikasında mübadilə qarşılıqlı təsirin ferromaqnit təbiətini göstərir.

Məlum olduğu kimi, maqnit momentin orta qiyməti xüsusi maqnitlənmə və tərkibin molekül çəkisi ilə düz, Avoqadro ədədi və Bor maqnetonu ilə tərs mütənəsbir [27].

$$\mu = \frac{\sigma \cdot m}{N_A \cdot \mu_B} = \frac{\sigma \cdot m}{5585} \cdot \mu_B$$

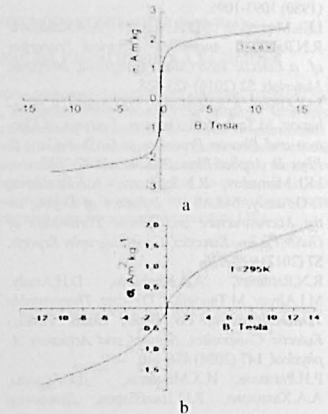
N_A - Avoqadro ədədi, μ_B - Bor maqnetonu, σ - xüsusi maqnitlənmə, m - tərkibin molekül çəkisidir. Azot temperaturu yaxınlığında tədqiq olunan evtektikanın orta maqnit momenti $\mu = 0.17 \mu_B$. Evtektik kompozit 300K temperaturadək qızdıqda maqnit momenti $\mu = 0,05 \mu_B$ qədər azalır. Yaxın maqnit nizamın yarandığı temperatur bölgəsində $360 < T < 650K$ xüsusi maqnitlənmə $0,19 Am^2kr^{-1}$ qiymətində, $0,02 Am^2kr^{-1}$ qiymətində, maqnit qavrayıcılığın isə $\chi = 3,1 \cdot 10^{-5}$ qiymətindən $\chi = 2,4 \cdot 10^{-6}$ qiymətində azalır.

Yaxın maqnit nizamlılığın kristal quruluşun deformasiyasının təzahürünün nəticəsi ola bilər. $360 < T < 650K$ temperatur aralığında yaxın maqnit nizamın saxlanması, çox güman ki, GaSb-Fe₃Ga kompozitində maqnit klasterlərin olması ilə əlaqədardır.

Məlumdur ki, tədqiq olunan evtektik ərinti sink-sulfid tipli struktura malik və kristal qəfəs sabiti $a = 6,096 \text{ \AA}$ olan yarımkeçirici GaSb matrisində və monoklin kristal qəfəs malik və elementar özəyin parametrləri $a = 10,102 \text{ \AA}$, $b = 7,666 \text{ \AA}$, $c = 7,881 \text{ \AA}$, $\beta = 106,26^\circ$, fəza qrupu $c2/m$ olan bərabər paylanmış Fe₃Ga maqnit qatıqlardan ibarətdir. Məlumdur ki, evtektika əmələ gəldiyi zaman yaranan qarşılıqlı potensial və fəzalar arası uyğunsuz-

luq fəzalar arası sərhəddə gərginliyin, defekt yığılmasının və ya dislokasiyaların yaranmasına səbəb olur [28]. Bütün bunlar klasterlərin və fəzalar arası zonaların yaranmasına gətirir. GaSb-Fe₃Ga evtektik kompozitində fəzalar arası zonalar və onlarda damir atomların varlığı müşahidə olunub. EDX analizi bunu inandırıcı şəkildə göstərir (şəkil 2). Fəzalar arası zonaların daşınma hadisələrində böyük rol oynamadı [7] işdə göstərilib. $230 < T < 555K$ temperatur aralığında yaxın maqnit nizamı ola bilsin ki, ancaq maqnit nizamlılığın olan fəzalar arası zonanın varlığı ilə bağlıdır. $\sigma = f(B)$ asılılığında doyma halın yaranmadığı maqnetizmin klaster tipli olduğunu göstərir. $230 < T < 555K$ temperatur aralığında kiçik qiymət ($0,2 \leq \sigma \leq 0,74 Am^2kr^{-1}$) alan xüsusi maqnitlənmə, ola bilsin ki, GaSb matrisində, Fe₃Ga qatıqlarında və fəzalar arası zonalarda zəif mübadiləli maqnit qarşılıqlı təsirlərin ümumi cəmindən qaynaqlanır.

4.6K və 295K temperaturlarda 14T maqnit sahəsində aparılan xüsusi maqnitlənmə ilqyində ($\sigma = f(B)$) histerezisin yaranmadığı (Şəkil 5) və kompozitin asanlıqla təkrar maqnitləndiyi aydın görünür.



Şəkil 5

GaSb-Fe₃Ga kompozitində 4,6 və 295K temperaturlarda və ±14T maqnit sahəsində xüsusi maqnitlənmənin $\sigma = f(B)$ sahə asılılığı.

Maqnit xarakteristikalarini öyrənölən təcrübələrini naticələrinə görə GaSb-Fe₃Ga₃ evtektik kom-

poziti PCM (phase-change memory) qurğularında tətbiqi üçün təklif oluna bilər.

1. A.Müller, M.Wilhem. *Über Den Gerichteteten Einbau Von Schwermetall Phasen in A^{III}B^V-Verbindungen: Die Eutektika GaSb-CrSb, GaSb-FeGa₃, GaSb-CoGa₃, InAs-CrAs Und InAs-FeAs, J. Phys. Chem. Solids*, **26** (1965) 2029-2035.
2. H.Wagini, M.Wilhelm. *Magnetische Und Electriche Messungen des System InSb-Mn, Zeit. Naturforsch.* **21a** (1966) 329-333.
3. C.Uher, H.J.Goldsmd. *A Comparison of Thermomagnetic Materials For Use of Room Temperature, Journal of Physics D: Applied Physics*, **5** (1972) 1478-1488.
4. M.I.Aliyev, S.G.Abdulnova, S.A.Aliyev. *Kineticheskie izmeneniya v evtekticheskom splovoe, Zhurn. Neorganicheskie materialy*, **10** (1974) 823-826.
5. M.I.Aliyev, D.G.Arasly, P.F.Guseynov, P.M.Djabbarov. *Teplno- i temperaturonporyvnoyevost evtektik na osnove InSb-MnSb, Zhurn. Neorganicheskie materialy*, **15** (1979) 1320-1323.
6. M.I.Aliyev, P.H.Dadashov, G.I.Safaraliev. *Issledovaniye kineticheskiy svoystv splovoev Ga₃MnSb v intervalle 80-1000K, FMM*, **49** (1980) 1093-1095.
7. I.Kh.Mamedov, D.H.Arasly, A.A.Khalilova, R.N.Rahimov. *Anisotropic Electrical Properties of a Eutectic InSb+MnSb Composite, Inorganic Materials*, **52** (2016) 423-428.
8. M.I.Aliyev, A.A.Khalilova, D.H.Arasly, R.N.Rahimov, M.Tanoglu, L.Ozyuzer. *Features of Electron and Phonon Processes in GaSb-FeGa₃, J. Phys. D: Applied Phys.*, **36** (2003) 2627-2633.
9. I.Kh.Mamedov, R.N.Ragimov, A.A.Khalilova, D.G.Arasly, M.I.Aliyev. *Influence of Doping on the Microstructure and Kinetic Parameters of GaSb-FeGa₃ Eutectics, Crystallography Reports*, **57** (2012) 923-926.
10. R.N.Rahimov, A.A.Khalilova, D.H.Arasly, M.I.Aliyev, M.Tanoglu, L.Ozyuzer. *Thermally Stable Tensoresistors of Co Doped GaSb-FeGa₃ Eutectic Composites, Sensors and Actuators A: physical*, **147** (2008) 436-440.
11. R.N.Ragimov, I.X.Mamedov, D.G.Arasly, A.A.Khalilova, P.M.Djabbarov. *Detektor teplovogo izlucheniya na osnove evtektiki InSb-FeSb, Prikladnaya fizika*, **5** (2006) 86-89.
12. M.I.Aliyev, A.A.Khalilova, D.H.Arasly, R.N.Rahimov, M.Tanoglu, L.Ozyuzer. *Strain Gauges of*

GaSb-FeGa₃ Eutectic Composites, Appl.Phys.A, **79** (2004) 2075-2079.

13. S.F.Marenkin, A.V.Kochura, I.V.Fedorchenko, A.D.Izotov, M.G.Vasil'ev, V.M.Trukhan, T.V.Shelkovaya, D.A.Novodvorskiy, A.L.Zheludkevich. *Growth of Eutectic Composites in the InSb-MnSb System, Inorganic materials*, **52** (2016) 268-273.
14. A.I.Dmitriev, A.V.Kochura, A.P.Kuz'menko, I.S.Parshina, O.A.Novodvorskiy, O.D.Khranovaya, E.P.Kochura, A.L.Vasil'ev, B.A.Aronzon. *Effect of Heat Treatment on the Dispersion of the Magnetic Anisotropy of MnSb NanoInclusions Embedded in Thin GaMnSb Films, Physics of the Solid State*, **61** (2019) 523-529.
15. B.A.Ivanov, T.G.Aminov, V.M.Povortortsev, V.T.Kalinnikov. *Статистика и статистические материалы, Известия РАН, серия химия*, **11** (2004) 2255-2303.
16. A.D.Talantsev, O.V.Kopalk, R.B.Morgunov. *Ferromagnetism and Microwave Magnetoresistance of GaMnSb Films, Physics of the Solid State*, **57** (2015) 322-330.
17. V.M.Novotortsev, S.F.Marenkin, I.V.Fedorchenko, A.V.Kochura, S.V.Drogunov, A.Lashkul, E.Lähderranta. *Synthesis and Magnetic Properties of the InSb-MnSb Eutectic, Russian Journal of Inorganic Chemistry*, **56** (2011) 1951-1956.
18. T.A.Nilsen, M.Breivik, G.Myrvågnes, B.Fimland. *Thermal expansion of GaSb measured by temperature dependent x-ray diffraction, Journal of Vacuum Science & Technology B*, **28** (2010) 3117.
19. N.Kawamiya, K.Adachi. *Magnetizing and Missbauer Studies of Metamagnetic FeGa₃, J. Phys. Soc. Japan*, **55** (1986) 634-640.
20. K.O.Moura, L.A.S.deOliveira, P.F.S.Rosa, C.B.R.Jesus, M.E.Saleta, E.Granado, F.Beron, P.G.Paglinso, K.R.Pirota. *Dimensionality Tuning of the Electronic Structure in Fe₃Ga₃ Magnetic Materials, Scientific Reports*, **6** (2016) 28364.
21. J.H.Mendez, C.E.Ekuma, Y.Wu, B.W.Fulfer, J.C.Prestigiacomo, W.A.Shelton, M.Jarrelly, J.Moreno, D.P.Young, P.W.Adams, A.Karki, R.Jin, Y.Ju.Chanand J.F.Ditus. *Competing Magnetic states, Disorder and the Magnetic Character of Fe₃Ga₃, Phys. Rev. B*, **91** (2015) 144409(1-12).

22. H.Wagini. *Magnetische, Elektrische und Thermische Eigenschaften der bcc-a-Phase im System Fe-Ga, Zeit. Naturforsch. A*, **22** (1967) 143-144.
23. H.G.M.Duijn, E.Brück, K.H.J.Buschow, F.R.de Boer, Van der Waals, K.Prokeš, V.Sečovský. *Pressure Dependence of the Ferromagnetic to Antiferromagnetic Transition in Fe₃(Ga_{1-x}Al_x)₃ with x=0.0 and 0.1, J. Appl. Phys.*, **85** (1999) 4738-4740.
24. N.Kawamiya, K.Adachi. *Magnetizing Phase Change in (Fe_{1-x}Co_x)Ga₃, J. Magn. Magn. Mat.*, **54** (1986) 941-945.
25. T.Moriya, K.Usami. *Coexistence of Ferro- and Antiferromagnetism and Phase Transitions in Itinerant Electron Systems, Solid State Commun.*, **23** (1977) 935-938.
26. P.K.Lotgering, E.W.Gorter. *Solid Solution between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Compounds with NEAs Structure, J. Phys. Chem. Solids, Pergamon Press*, **3** (1957) 238-249.
27. V.P.Sanygin, A.D.Izotov, O.N.Pashkova. *Dislocation Magnetism of the GaSb-AIn> Semiconductor, Inorganic Materials*, **55** (2019) 892-897.

MAGNETIC PROPERTIES OF GaSb-Fe₃Ga₃ EUTECTIC KOMPOZITE

I.Kh.MAMMADOV, K.LYANUSHKEVICH, D.H.ARASLY, R.N.RAHIMOV, A.A.KHALILOVA

A magnetic multicomponent semiconductor eutectic composite GaSb-Fe₃Ga₃ has been synthesized. An X-ray phase analysis was carried out at different temperatures, and the elemental composition of the matrix, metal inclusions and the interphase zone were determined. The features of specific magnetization and magnetic susceptibility were studied using the ponderomotive method in the temperature range –80-750K and the vibration method at 4.6k and 295k in magnetic fields with induction up to B=±14Tl. It is shown that the GaSb-Fe₃Ga₃ eutectic composite has the properties of a magnetic substance with a Curie temperature T_c=355K. It has been established that at the liquid nitrogen temperature the composite has a specific magnetization σ ≈1.5A·m²·kg⁻¹ and an average magnetic moment μ=0.17μ_B. It has been revealed that the magnetic characteristics of the composite are resistant to thermal loads up to 750K and to external magnetic fields up to 14Tl.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА GaSb-Fe₃Ga₃

I.X.MAMEDOV, K.IYANUSHKEVICH, D.G.ARASLY, R.N.RAGIMOV, A.A.KHALILOVA

Спигтеризован магнитный многокомпонентный полупроводниковый эвтектический композит GaSb-Fe₃Ga₃. Проведен рентгенофазовый анализ при разных температурах, определен элементный состав матрицы, металлических включений и межфазной зоны. Пондеромоторным методом в интервале температур –80-750К и вибрационным методом при 4,6к и 295к в магнитных полях с индукцией до B=±14Тл изучены особенности удельной намагниченности и магнитной восприимчивости. Показано, что эвтектический композит GaSb-Fe₃Ga₃ обладает свойствами магнитного вещества с температурой Кюри T_c=355К. Установлено, что при температуре жидкого азота композит имеет удельную намагниченность σ ≈1,5А·м²·кг⁻¹ и средний магнитный момент μ=0,17μ_B. Выявлено, что магнитные характеристики композита устойчивы к тепловым нагрузкам до 750К и воздействию внешних магнитных полей до 14Тл.