

УДК: 535.375.54

КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА InSb-FeSb

И.Х.МАМЕДОВ

*Национальная Академия Авиации Азербайджана
Az 1045, Баку, пр.Мардакан, 30
imamedov10@mail.ru*

Получена: 02.06.2021

Принята к печати: 17.09.2021

Ключевые слова: эвтектический композит, межфазные зоны, магнитосопротивление, детектор.

РЕФЕРАТ.

Исследованы электрические и тепловые свойства эвтектического композита InSb-FeSb в диапазоне температур 80–450K и магнитном поле до 0,65T. Наблюдена анизотропия кинетических параметров при взаимных направлениях тока, магнитного поля и включений. Установлено, что межфазная зона наряду с включениями играет существенную роль в анизотропии электропроводности. Показано, что эвтектический композит InSb-FeSb - перспективный материал для термостабильных датчиков сопротивления и детекторов теплового потока при комнатной температуре и магнитном поле 0,6 Тл.

ВВЕДЕНИЕ

Переходные элементы группы железа в полупроводниковых соединениях A^3B^5 создают глубокие локализованные состояния, волновые функции которых делокализируются в пределах нескольких координационных сфер основной решетки. При повышенном количестве примесей в соединениях образуются различные кластеры 3d-элементов, а при определенных режимах кристаллизации - эвтектический композит, состоящий из полупроводниковой матрицы и регулярно распределенного магнитного включения (соединения примесей с атомами основной решетки) в виде направленных игл [1]. Наличие магнитного включения в матрице придает композиту уникальные физические свойства. Эти эвтектики являются магнитными полупроводниками и предполагается возможность их использования для создания различных устройств спинтроники. В настоящее время наиболее изучены $A^3B^5:Mn$ [2-4] и $A^3B^5:MnSb$ [5-8]. Одним из интересных и, в тоже время, дискуссионных материалов являются узкозонные полупроводники InSb, InAs и GaSb с атомами железа. Полупроводни-

ковое соединение InSb с железом определенной концентрации образует эвтектический композит. В [1] показано, что InSb-FeSb двухфазный сплав, состоящий из матрицы InSb и монокристаллического включения FeSb. Композит InSb-FeSb в [9] получен при разных скоростях кристаллизации и показана возможность контролировать геометрические размеры включения FeSb и их дисперсность. В [10] образцы InSb с менее одним процентом железа также содержали включения второй фазы FeSb. Авторы исследованием электрических и гальваномагнитных свойств InSb с различным содержанием железа пришли к выводу, что обнаруженная аномалия эффекта Холла и появление дополнительного механизма рассеяния носителей заряда связана с присутствием FeSb. Однако в [11] показано, что в узкозонных полупроводниках атомы железа находятся в нейтральном состоянии. Последнее время появились работы [12,13], в которых методом импульсного лазерного распыления получены эпитаксиальные слои InSb, InAs и GaSb с высокой концентрацией железа (более 10%), обладающие ферромагнитными свойствами без наличия второй фазы FeSb. Авторы пришли к

выводу, что в слоях механизм ферромагнетизма не связан со второй фазой. В данной работе с целью выяснения роли включений в переносе носителей заряда и тепла проведены комплексные исследования кинетических коэффициентов в эвтектическом композите InSb-FeSb в интервале температур 80–450К.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованная эвтектика получена сплавлением InSb с 0,65 вес % FeSb вертикальным методом Бриджмена со скоростью передвижения фронта кристаллизации 6 см/ч при строгом выполнении перпендикулярности плоскости фронта кристаллизации к направлению вытяжки. Микроскопический анализ, проведенный на микроскопе МИМ-8, показал, что фаза FeSb в полупроводниковой матрице InSb распределена почти равномерно и сформирована в виде параллельно ориентированных игл с диаметром 0,5мкм, длиной 20-100мкм и плотностью на единицу площади $2,2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Полученный кристалл имел электронный тип проводимости с концентрацией $4,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Термографические исследования проведены на дериватографе со скоростью нагрева 10К/мин до 1273К. Рентгенофазовый анализ образцов выполнен на дифрактометре Bruker A8 Advance в $\text{CuK}\alpha$ излучении при $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$. Электрические свойства исследованы компенсационным методом, теплопроводность измерена абсолютным стационарным методом и исследованном температуропроводности методом светового импульсного нагрева.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис.1 представлены результаты термического анализа композита InSb-FeSb. Эндотермический пик, наблюдаемый на кривой ДТА при температуре 803К, относится к процессу плавления и фиксируется лишь на кривой ДТА (кривые ТГ и ДТГ не изменяются).

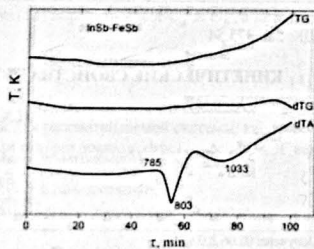


Рис.1

Термограммы эвтектического композита InSb-FeSb.

Вслед за процессом плавления начинается экзотермический эффект характерный для процессов окисления и на термографических кривых наблюдается увеличение веса. На основе этих исследований определены основные термодинамические параметры композита: температура начала $T_1 = 785 \text{ K}$ и конца $T_2 = 813 \text{ K}$ плавления, теплота $Q = 20,2 \text{ Дж/К моль}$ и энтропия $S = 5,88 \text{ Дж/К моль}$ с точностью 2-3%. Двухфазность системы подтверждена также рентгенофазовым анализом. Дифрактограмма порошка InSb-FeSb при комнатной температуре представлена на Рис.2. Как видно, дифрактограмма содержит рефлексы, соответствующие соединениям InSb и FeSb.

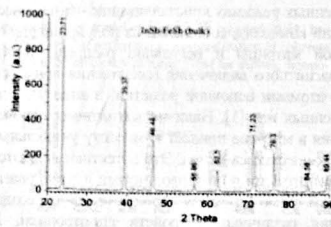


Рис.2

Дифрактограмма эвтектического композита InSb-FeSb. (Интенсивные линии соответствуют соединению InSb, а слабые - FeSb).

Температурные зависимости электропроводности σ , термоэда α , коэффициента Холла R , температуропроводности a и теплопроводности κ при различных взаимных направлениях электрического тока I , магнитного поля B , теплового потока W (или ΔT) и направления роста кристалла x представлены на Рис. 3. Как видно, измеренные кинетические коэффициенты при различных ориентациях I , B , ΔT и x имеют анизотропию, величина которой с повышением температуры уменьшается. Из Рис.3а видно, что в случае $\parallel x$ σ соответствует проводимости σ матрицы InSb соответствующей концентрации, а при $\perp x$ ввиду короткозамыкающего действия включения происходит увеличение электропроводности. Закорачивание термоэда матрицы включениями при $\perp x$ приводит к понижению термоэда α вдоль образца (Рис.3б). Вследствие закорачивания тока включениями вдоль образца $\parallel x$ $\perp B$, а также напряжения холла в случае $\perp x$ $\perp B$ коэффициент Холла минимален. В случае, когда включения расположены перпендикулярно электрическому току и параллельны силовым линиям магнитного поля $\perp x$ $\parallel B$, значение R максимально (Рис.3в). При этом ток вдоль образца и эда холла не закорачиваются включениями, концентрация и холловская подвижность носителей заряда определены в случае $\perp x$ $\parallel B$ ($n = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\mu = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В}$ с при $T = 300 \text{ K}$). Анизотропия теплопроводности наблюдается, в основном, при низких температурах 80К, отношение $\kappa_{\perp} / \kappa_{\parallel} = 1,2$. При комнатной температуре и выше значения κ_{\parallel} и κ_{\perp} почти не отличаются. Следует отметить, что все это качественно объясняет процессы переноса носителей заряда и тепла в эвтектике. Задача количественного вычисления эффективных параметров в неоднородных средах, к которым относятся и композитные материалы, остается предметом обсуждений, в настоящее время отсутствует единая теория. Наиболее универсальным методом при интерпретации экспериментальных данных по исследованию композитов является приближение эффективной среды. Обобщенная проводимость системы по свойствам фаз вычисляется по формулам, полученным из определенных модельных представлений.

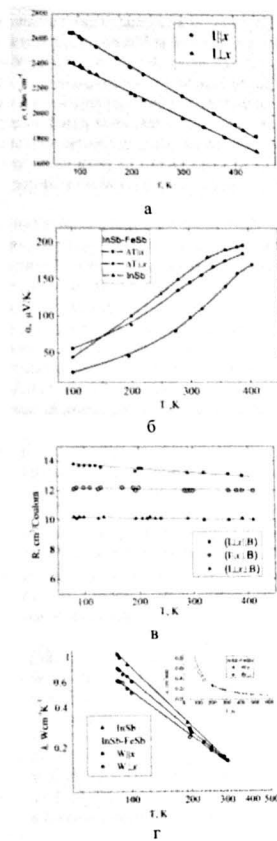


Рис.3

Температурные зависимости электропроводности (а), термоэда (б), коэффициента Холла (в) и теплопроводности (на вставке температуропроводности) (г) InSb-FeSb при различных направлениях тока и градиента температуры и включений.

Широко применимы классическая модель матричной среды Максвелла-Гарнета [14] и статическая среда Бруттмена [15]. Модель Максвелла-Гарнета справедлива, когда одна фаза представляет собой матрицу, а другая образует в ней с малой объемной долей изолированные включения. Модель Бруттмена используется, когда в композите нельзя выделить матрицу и включения. В этой модели предполагается, что включения находятся не в матрице, а в эффективной среде с параметрами, отличающимися от компонентов. Существующие методы не позволяют удовлетворительно получить распределение полей по образцам и их зависимость от коэффициентов кинетических свойств фаз, формы и геометрии включения и условий на границе фаз. В основном, рассматриваются плоский случай и расположение включений правильной формы [16], хотя в последнее время развиваются методы определений различных физических свойств в анизотропных композитах [17]. Во всех выражениях, полученных на основе имеющихся моделей, в основном, присутствуют парциальные кинетические коэффициенты фаз и объемная доля включения. В данном случае при интерпретации экспериментальных результатов в эвтектике InSb-FeSb нами использована модель обобщенной проводимости в двухфазных системах с цилиндрическими включениями [18]. Согласно [18], эвтектическая структура представлена в виде двух параллельно соединенных или как комбинация параллельно и последовательно соединенных сопротивлений. При T||x (последовательное соединение)

$$\sigma_{||} = \sigma_1 \frac{1}{1+c} + \sigma_2 \frac{c}{1+c}, \quad (1)$$

а при T⊥x (комбинация параллельного и последовательного сопротивления)

$$\sigma_{\perp} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)(1 - \sqrt{c(1+c)}) + \sigma_1 \sqrt{(1+c)/c}}{1 + (\sigma_2/\sigma_1)\sqrt{(1+c)/c}} \quad (2)$$

где σ_1 и σ_2 электропроводности полупроводника и включения, c - объемная доля включения, которая определяется как

$$c = \frac{V_1 N_1}{1 - V_1 N_1}, \quad (3)$$

здесь V_1 - объем одного включения, N_1 - плотность включения.

Как известно, FeSb антиферромагнетик и при комнатной температуре $\sigma = 3 \cdot 10^6 \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Из-за отсутствия данных температурной зависимости σ FeSb нами была решена обратная задача. Совместно решая формулы (1) и (2) относительно электропроводности матрицы и включения и подставляя значения объемной доли c и экспериментальные данные электропроводности при различных направлениях электрического тока и угла ($\sigma_{||}$ и σ_{\perp}), определили вклады компонентов в проводимость эвтектики (Рис.4, кривые 1и 2).

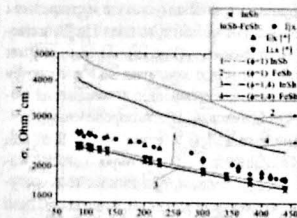


Рис.4
Температурные зависимости электропроводности InSb-FeSb.

Как видно, в случае T||x расчетная электропроводность близка к экспериментальной, а при T⊥x вычисленное значения σ при комнатной температуре намного меньше значения электропроводности FeSb, что, по-видимому, связано с не учетом роли межфазного взаимодействия в проводимости. При этом, одной из возможных причин является возникающее рассогласование решеток InSb и FeSb. Как отмечено выше, исследуемый эвтектический

композит представляет полупроводниковую матрицу InSb, обладающую структурой цинковой обманки с параметром решетки $a=6.47\text{ \AA}$, пространственной группой F43m и регулярно распределенными магнитными включениями FeSb с гексагональной кристаллической решеткой: $a=4.1$; $b=4.1$; $c=5.14\text{ \AA}$ и $V=74.828\text{ \AA}^3$, пространственной группой R6/mmm [19]. В процессе кристаллизации эвтектики соединения InSb и FeSb принимают относительноную ориентацию и вследствие несоответствия между этими структурами на границе их возникает значительное механическое напряжение. С другой стороны, искажение кристаллической решетки в местах сопряжения фаз создает дислокации, на которых возможна сегрегация примесных атомов [20]. По теории дислокации возникновение дислокаций может занести энергию деформации на межфазной границе. Кроме того, при образовании эвтектики между атомами фаз происходит перераспределение электронной плотности и на границе их возникает связь по энергетически выгодным направлениям. Энергия межфазной границы в эвтектике InSb-FeSb изучена в [9] и составляет $930 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2}$. Вследствие таких изменений как структурная реконструкция, возникновение дислокаций, перераспределение электронных плотностей и т.д. на границе полупроводник-включение вкдт. на границе включения формируется оболочка - межфазная зона. Наличие облака вокруг включения в нано- и микро-композитных материалах экспериментально обнаружено в работах [21,22].

В настоящее время изучению межфазных взаимодействий в композитах уделяется особое внимание. При интерпретации экспериментальных данных по исследованию композиционных материалов в зависимости от количества включений и размеров межфазной зоны используются разные теории и модели [23]. Так, если вокруг включения межфазная зона слабо выражена, то эффективная проводимость рассчитывается в рамках теории эффективной среды и учитывается роль матрицы и включения. При наличии неперекрывающихся межфазных зон эффективная проводимость определяется по теории эффективной

среды в модели матрица, включение и межфазная зона. В случае, когда межфазные зоны соседних включений перекрываются, применяется теория сильно компенсированных разупорядоченных структур с флуктуирующей потенциальной рельефа. В таких системах пространственно модулируется концентрация равновесных носителей заряда и зонная структура. Несмотря на значительное число работ в настоящее время нет точного метода расчета влияния межфазной зоны на кинетические свойства в эвтектике. В связи с отсутствием бесконечных кластеров в композите InSb-FeSb учет дополнительного объема, занимаемого межфазной областью, в электропроводности проведен нами по модифицированной модели [6]. Следует отметить, что этот метод успешно применен для эвтектических композитов InSb-MnSb [6]. В этой модели включение с зоной вокруг него представляется как одна фаза в форме цилиндра с проводимостью включений, и в формулах (1) и (2) объемная доля c (3) заменена ее эффективным значением c_{ef}

$$c_{ef} = \frac{V_{ef} N}{V_m} = \frac{V_1 N_1 \phi^2}{1 - V_1 N_1 \phi^2}, \quad (4)$$

$$V_{ef} = \pi a^2 \phi N_1 l_1 = V_1 N_1 \phi^2, \quad (5)$$

где $\phi = \frac{b}{a}$, a и b - радиусы включения и эффективного цилиндра, соответственно.

Проводимости компонентов эвтектики, определенные совместным решением (1) и (2) с эффективной долей второй фазы (4) показаны на Рис.4. При расчетах отношение радиуса межфазной зоны к радиусу включений ϕ является подгоночным и определено путем аппроксимации. Полученная величина $\phi=1.4$ означает, что межфазная зона наряду с включениями играет существенную роль в короткозамыкании тока и, соответственно, в анизотропии электропроводности.

Нами проведено исследование проводимости композита InSb-FeSb в магнитном поле. Экспериментальные данные по полевой зависимости поперечного магнитосопротивления (MC) InSb-FeSb $\Delta\rho/p = (\rho(B) - \rho(0))/\rho(0)$ при температурах 300 и 80K при различных ориента-

дциях электрического тока I , магнитного поля B и направления роста кристалла x представлены на Рис.5. Как видно, МС во всех ориентациях положительно. Из рисунка видно, что $\Delta\rho/r$ при комнатной температуре и $B=0,65T$ в ориентации $||x||B$ имеет наибольшее значение. Это значение в два раза больше по сравнению с гомогенным InSb. Кроме того, при этой ориентации температурный коэффициент $\rho(B)$ в области температуры 100-300K и $B=0,6T$ почти стабилен и равен $0,09\%/град$ (вставка Рис.5).

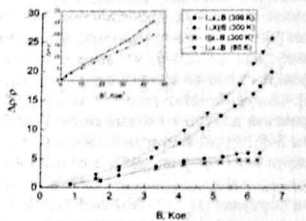


Рис.5

Магнитосопротивление InSb-FeSb при 300K и 80K (вставка $\Delta\rho/\rho$ от T).

Известно, что в полупроводниках природа положительного магнитного сопротивления (ПМС) обусловлена удлинением пути носителей в магнитном поле под действием силы Лоренца и компенсирующим действием холловского поля. Для увеличения величины изменения сопротивления в магнитном поле необходимо уменьшить разности потенциалов холла. В эвтектических композитах полупроводник-металл благодаря наличию высокопроводящих игл металлической фазы холловское поле закорачивается и, следовательно, возникает увеличение МС. Кроме того, как отмечено выше, проводимость эвтектики определяется проводимостью фаз, межфазной зоны и формой, и размерами включений, а вероятность туннелирования носителей определяется размерами и расстоянием между включениями. В эвтектических композитах с микроразмерными включениями носители тока при движении под действием магнитного поля встречаются с высоко-

проводящими иглами, и электрическая сила возвращает их к началу игл. Вследствие этого при определенной ориентации холловское поле закорачивается иглами. В эвтектике InSb-FeSb большое значение $\Delta\rho/r$ связано с закорачиванием поля холла иглами при $||x||B$. На это указывает температурная зависимость коэффициента Холла, приведенная на Рис.3с. Отметим, что уменьшение эффективной длины свободного пробега носителей в этой ориентации сильнее по сравнению с другими ориентациями. Как видно (вставка на Рис.5), выполняется квадратичная зависимость магнитосопротивления от магнитного поля. Это характерно для полупроводников в слабых магнитных полях с одним типом носителей. Известно, что МС при $uB \ll 1$ зависит от подвижности носителей, функции времени релаксации, усредненной по энергии, и квадрата напряжения магнитного поля [24]. В сильных магнитных полях, в основном, при низких температурах наблюдается и отрицательное магнитосопротивление (ОМС), что интерпретируется на основе теории квантовых поправок к кинетическим коэффициентам в магнитном поле. Однако в магнитных полупроводниках МС имеет сложную природу. МС в полупроводниках с магнитными включениями изучено как в объемных кристаллах [26-29], так и пленках [30-32]. При низких температурах наблюдается гигантское отрицательное магнитосопротивление. Одно из возможных объяснений механизма возникновения МС в эвтектических композитах приведено в работах [25-32]. В [32] показано, что в эвтектиках, содержащих ферромагнитные кластеры, полное МС формируется конкуренцией отрицательных и положительных членов и существенна роль парамагнетизма матрицы. МС в пленках эвтектического композита объясняется на основе концепции магнитных поляронов, создаваемых захватом носителей вблизи границы кластера из-за локального гигантского зеемановского расщепления. Показано, что в парамагнитной матрице происходит выравнивание спинов носителей и возникает отрицательное МС. С увеличением температуры ОМС уменьшается, становится положительным, что связано с разностью спи-

новой ориентации кластеров и основных носителей. Отметим, что положительное МС наблюдалось во многих полупроводниках, содержащих микроразмерные включения [26-29], пленках [30,31] и магнитогранулированных структурах полупроводник-ферромагнетик [26-32]. Показано, что ПМС зависит от размера, формы и распределения включений. В [26] показано, что эвтектика с игольчатыми включениями имеет положительное МС, а с микроструктурой пластинчатого типа наблюдается отрицательное магнитосопротивление. Положительное магнитосопротивление эвтектического композита InSb-FeSb, по-видимому, как в [26], связано с игольчатой формой включений. Наблюдаемое большое значение и стабильность магнитосопротивления композита InSb-FeSb делает его перспективным материалом для термостабильных датчиков магнитосопротивления.

В эвтектическом композите InSb-FeSb в результате закорачивающего действия направленных металлических игл, как в случае магнитосопротивления, термомагнитная эдс также увеличивается по сравнению с гомогенным InSb.

На Рис.6а приведены результаты исследований коэффициента поперечного эффекта Нернста-Эттингсгаузена ($N-E$) при температурах 300K и 80K и в магнитном поле до 0,65T. Как видно из рисунка, наибольшая величина Q и соответственно коэффициент безразмерного поля $e_H = e/kQB$ (Рис.6б) при $\Delta T ||x||B$. Это связано с тем, что при рассматриваемой ориентации в эвтектике полупроводник-металл кроме поперечного поля $N-E$ из-за закорачивания иглами тока, создаваемого в них термоэлектрическим полем, возникает эффект Холла, который измеряется как эдс $N-E$. Для идеального закорачивания коэффициент $N-E$ $Q = Q_{in} + Q_x$ (или $e_H = e_{in} + e_x$), где Q_{in} - коэффициент $N-E$, выражение для которого в полупроводниках при слабых и сильных магнитных полях приведено в [24,25], $Q_x = R_{H1}/\rho_H$ - холловская составляющая. Отношение между этими составляющими определяет величину, а также температурную и полевую зависимости безразмерного поля $N-E$.

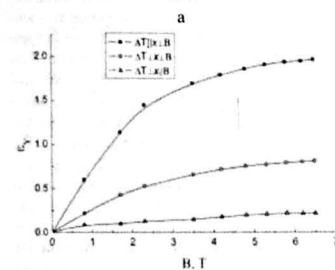
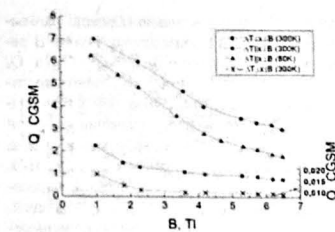


Рис.6

Полевые зависимости коэффициента Нернста-Эттингсгаузена (Q) при 80K и 300K (а) и коэффициента безразмерного поля e_H (б) при различных направлениях градиента температуры ΔT , включений x и магнитного поля B .

В [34] ввиду малой доли металлической фазы и большой величины отношения длины игл к их сечению эвтектический композит рассматривается как система макроэкономически гомогенная и для коэффициента $N-E$ приведено выражение, определяемое кинетическими коэффициентами матрицы и отношением проводимости фаз. Отметим, что в [34] рассмотрен случай бесконечно большой проводимости игл. Однако в эвтектических композитах из-за прерывистости игл идеального закорачивания не происходит. В работе [35] учтено запинание закорачивающего действия игл на термозде за счет их непараллельности и наличия промежутков между ними. Приведены формулы для термомагнитных эффектов в области примесной проводимости в слабых и сильных

магнитных полях и в сильно вырожденных полупроводниках в произвольных полях. В эвтектическом композите InSb-FeSb $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{д}}$ имеют одинаковый знак, вследствие чего измеренный $\epsilon_{\text{в}}$ больше в 2 раза, чем в однородном InSb. Заниженное значение $\epsilon_{\text{в}}$ при $\Delta T |x|_{\text{LВ}}$, как и для коэффициента Холла (Рис.3в) связано с закорачиванием поля Н-Э. Получено, что $\epsilon_{\text{в}}$ до температуры 350К определяется, в основном, холловской составляющей. Уменьшение $\epsilon_{\text{в}}$ выше 350К связано с уменьшением с температурой как подвижности электронов, так и с закорачивающим действием металлического включения. Увеличение безразмерного поля Н-Э в эвтектических композитах полупроводник-металл позволило рекомендовать их как перспективный материал для термомагнитных преобразователей ИК-излучения.

Известно, что в качестве активного элемента в таких приемниках, в основном, используются монокристаллы и пленки композитов на основе узкозонных полупроводников. Основные параметры преобразователей, в основном, зависят от коэффициента Н-Э, теплопроводности и электросопротивления чувствительного элемента, а обнаружительная способность и инерционность также и от толщины чувствительного элемента. Материалы с высокой δ находят применение в измерителях теплового потока, с высоким F - детекторах излучения, а с высоким Z - в преобразователях энергии. Как уже отмечено, материал, используемый в качестве чувствительного элемента для термомагнитных преобразователей, должен иметь большое значение безразмерного поля Н-Э и низкое значение теплопроводности. В эвтектике InSb-FeSb при $\Delta T |x|_{\text{LВ}}$ $\epsilon_{\text{в}}$ по сравнению с однородным InSb увеличивается в несколько раз ($\epsilon_{\text{в}} > 2$), а теплопроводность

уменьшается. Используя выпеприведенные значения измеренных кинетических параметров, оценили основные характеристические параметры тепловых преобразователей с чувствительным элементом InSb-FeSb. Расчет показал, что при $T=300\text{К}$ и $B=0,6\text{Тл}$ удельная чувствительность $\delta=1,10^5\text{В.м.Вт}^{-1}$, добротность $Z=0,4,10^3\text{К}^{-1}$, фактор добротности $F=2,8,10^4\text{Вт}^{-1}\text{м.с}^{-1/2}$ и при толщине чувствительного элемента 1мм обнаружительная способность и инерционность составляют $D=0,45 \times 10^8\text{Вт}^{-1}\text{м.Гц}^{1/2}$ и $\tau=35\text{мс}$, соответственно. Полевые зависимости δ и F при $T=300\text{К}$ приведены на Рис.7.

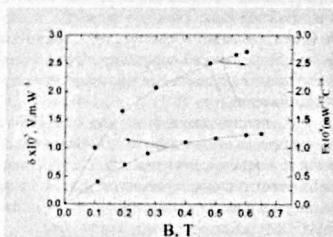


Рис.7

Полевые зависимости удельной чувствительности δ и фактора добротности F при 300 К.

Отметим, что фактор добротности F эвтектики InSb-FeSb выше, чем в перспективных для термомагнитных преобразователей материалах, приведенных в [36]. Таким образом, эвтектический композит InSb-FeSb может быть использован в качестве активного элемента детектора теплового потока при комнатной температуре и слабом магнитном поле.

1. A.Müller, M.Wilhelm. *Über Den Gerichtet Einbau von Schwermetallphasen in A³B⁵-verbindungen*, *J. Phys. und Chem. Solids*, **26** (1965) 2029-2035.
2. T.Dietl, H.Ohno, F.Mutsurura. Hole-mediated ferromagnetism in tetrahedrally coordinated. Semiconductors, *Phys. Rev. B*, **63** (2001) 195205.

3. V.A.Ivanov, P.M.Krstajic, F.M.Peters et al. *On the Nature of Ferromagnetism in Diluted Magnetic Semiconductors: GaAs:Mn and GaP:Mn*, *J. Magn. Magn.Mater.*, **258-259** (2003) 237-241.
4. W.Heimbrodt, P.J.Klar, S.Ye et al. *Magnetic Interactions in Granular Paramagnetic-Ferro-*

5. A.I.Дмитриев, А.В.Кочура, А.П.Кузьменко, Л.С.Паршина, О.А.Новодворский, О.Д.Храмова, Е.П.Кочура, А.Л.Васильев, Е.И.Хасяева, Б.А.Аронзон. *Влияние температуры роста и пространственного отжига на магнитные свойства наночастиц Mn_{1-x}Sb_x внедренных в тонкие пленки GaSb*, *ФТТ*, **62** (2020) 203-207.
6. I.Kh.Mamedov, D.N.Arasly, A.A.Khalilova, R.N.Rahimov. *Anisotropic electrical properties of a eutectic InSb+MnSb composite*, *Inorganic Materials*, **52** (2016) 423-428.
7. О.В.Копцак, А.А.Поляков, А.Б.Давыдов, Р.Б.Моргунов, А.Д.Таланцев, А.В.Кочура, И.В.Федорченко, Л.С.Паршина, О.А.Новодворский, О.Д.Храмова, А.В.Шорохова, Б.А.Аронзон. *Взаимосвязь намагниченности и электрических свойств в пленках сплавов GaSb-MnSb*, *ЖЭТФ*, **147** (2015) 1170-1178.
8. С.Ф.Маренкин, А.В.Кочура, И.В.Федорченко, А.Д.Изовтов, М.Г.Васильев, В.М.Трухан, Т.В.Шелкова, О.А.Новодворский, А.Л.Желудкевич. *Выращивание эвтектических композиций в системе InSb-MnSb*, *Неорганические материалы*, **52** (2016) 309-319.
9. Y.Umehara, S.Koda. *Structure of InSb-FeSb and InSb-CrSb eutectic alloys by directional solidification*, *J. Japan. Inst.Metals*, **38** (1974) 42-46.
10. К.И.Винаградова, В.С.Ивлева, Г.В.Ильменков, Д.Н.Наследов, Ю.С.Сметанникова, Т.К.Ташходжаев. *Некоторые особенности поведения железа в антимониде индия*, *ФТП*, **6** (1972) 1845-1850.
11. N.T.Tu, P.N.Hai, L.D.Anh, M.Tanaka. *High-temperature ferromagnetism in heavily Fe-doped ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb*, *Appl. Phys. Lett.*, **108** (2016) 192401.
12. Ю.А.Данилов, А.В.Кудрин, В.П.Лесников, О.В.Вахрова, Р.Н.Крюков, И.Н.Антонов, Д.С.Толкачев, А.В.Алафердов, З.Э.Кульцова, М.П.Темирязова, А.Г.Темирязов. *Исследование особенностей формирования и свойств полупроводников Al^{III}Fe^V сильно легированных железом*, *ФТТ*, **60** (2018) 2137-2140.
13. А.В.Кудрин, Ю.А.Данилов, В.П.Лесников, О.В.Вахрова, Д.А.Павлов, Ю.В.Усов, Е.А.Питгиримова, И.Н.Антонов. *Однофазные эпитаксиальные слои InFeSb с температурой Кюри выше комнатной*, *ФТТ*, **59** (2017) 2200-2202.
14. J.C.Maxwell-Garnett. *Colours in metal glasses and in metallic films*, *Philos. Trans. R. Soc. London*, **203** (1904) 385.
15. D.A.G.Bruggeman. *Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen systemen*, *Ann. Phys. (Leipzig)*, **24** (1935) 636.
16. В.В.Крюк, Д.А.Молодцев, А.В.Пилонин, А.А.Повзнер. *Влияние циркуляционных токов на теплопроводность сегнетоэлектрических систем*, *ЖЭТФ*, **73** (2003) 78-81.
17. Б.Я.Балугуров. *Преобразование симметрии в зазвоне о проводимости анизотропных композитов*, *ЖЭТФ*, **144** (2013) 1036-1044.
18. W.K.Liebman, E.A.Miller. *Preparation, phase-boundary energies and thermoelectric properties of InSb-Sb eutectic alloys with ordered microstructures*, *J. Appl. Phys.*, **34** (1963) 2653-2659.
19. E.A.Vasilev, V.A.Virchenko. *Solid solutions in the (FeSb)_{1-x}(FeSn)_x system*, *Physica Status Solidi A*, **70** (1982) 141-143.
20. В.П.Савицкий, А.Д.Изовтов, О.Н.Пашкова. *Дислокационный магнетизм полупроводника GaSb<Mn>*, *Неорганические материалы*, **55** (2019) 946-951.
21. J.R.Kalnin, E.Kotomin. *Modified Maxwell-Garnett equation for the effective transport coefficient in homogeneous media*, *J. Phys. A: Math. Gen.*, **31**(1998) 7227-7234.
22. O.Moosavi, P.Sarkomaa. *The effective conductivity of three-phase composite materials with circular cylindrical inclusions*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36** (2003) 1644-1650.
23. С.П.Зимин. *Классификация электрических свойств пористого кремния*, *ФТП*, **34** (2000) 359-363.
24. Б.М.Аскеров. *Электронные явления переноса в полупроводниках*, *М.* (1985) 318.
25. И.М.Пидильковский. *Термомагнитные явления в полупроводниках*, *Физ.-мат. изд.*, (1960) 396.
26. С.Ф.Маренкин, И.В.Федорченко, А.Д.Изовтов, М.Г.Васильев. *Физико-химические основы синтеза магнитоэлектрических структур полупроводник-ферромагнетик на примере A³GeAs₂A⁵Zn. Cd. Неорганические материалы*, **55** (2019) 920-926.
27. K.Zuzmina, B.A.Aronzon, A.V.Kochura, A.V.Lashkul, K.G.Lisunov, E.I.Ohleranta, M.A.Shakhov. *Magnetotransport of indium antimonide doped with manganese*, *EPJ, Web of Conferences*, **75** (2014) 05014.

28. Л.А.Сайгулаев, М.М.Гаджиалиев, А.Г.Алибеков, И.В.Мельникова, В.С.Захвалинский, А.И.Риль, С.Ф.Маренкин, Т.Н.Эфендисва, И.В.Федорченко, А.Ю.Моллаев. Влияние гидростатического давления до 9ГПа на гальваномагнитные свойства сплава системы $CdAs_2-MnAs$ (20mol%) в поперечном магнитном поле, *Неорганические материалы*, **55** (2019) 927-932.
29. S.F.Marenkin, A.D.Izotov, I.V.Fedorchenko, Novotorsev. *Manufacture of Magnetic Granular Structures in Semiconductor-Ferromagnet systems*, *J. Inorg. Chem. (Russ.)*, **60** (2015) 295-300.
30. A.Kochura, S.Marenkin, O.Novodvorsky, V.Mikhalevsky, A.Davidov, M.Shakhov, E.Lahderanta, V.Zakhvalinskii, A.Kuzmenko. *Magnetotransport properties of InSb-MnSb nanostructured films*, *EPJ Web of Conferences*, **185** (2018) 06003.
31. M.Csontos, T.Wojtowicz, X.Liu, M.Dobrovolska, B.Janko, J.K.Furduna, G.Mihaly. *Magnetic scattering of spin polarized carriers in (In,Mn)Sb dilute magnetic semiconductor*, *Ph*
32. G.Zarad, C.P.Moca, B.Janko. *Scaling theory of magnetoresistance in disordered local moment ferromagnets*, *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 247203.
33. M.A.Milner, A.Gerber, B.Groisman, M.Karpovsky, A.Gladkikh. *Spin-dependent electronic Transport in granular ferromagnets*. *Phys. Rev. Lett.*, **76** (1996) 475.
34. H.J.Goldsmid, K.R.Syndney. *A thermal radiation detector employing the Nernst effect in $CdAs_2-NiAs$* , *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **4** (1971) 869-875.
35. М.А.Сиповская, Ю.С.Сметаникова. *Фототермомомагнитный эффект в эвтектических сплавах InSb-NiSb*, *ФТП*, **21** (1987) 1242-1246.
36. C.Uher, H.J.Goldsmid. *A comparison of thermomagnetic materials for use at room temperature*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **5** (1972) 1478-148.

InSb-FeSb EVTEKTİK KOMPOZİTİN KİNETİK XASSƏLƏR

I.Х.МƏММƏДОВ

InSb-FeSb evtektik kompozitin 80-300K temperatur bölümündə və 0.65T qədər maqnit sahəsində elektrik və istilik keçiriciliyi tədqiq olunub. Maqnit sahəsinin, elektrik cərəyanı və qatıqların qarşılıqlı istiqamətində anizotropluq müşahidə olunub. Qatıqlar ətrafında yaranan fazalararası zona elektrik keçiriciliyin anizotropluğunda əhəmiyyətli rol oynayır. Maqnit müqavimətin və Nernst-Fittingshauzen effektin tədqiqi ilə InSb-FeSb evtektik kompoziti otaq temperaturunda və 0.6 T maqnit sahəsində istilik selinin detektorlarında və termostabil müqavimatlı sensorların yaradılmasında aktiv element kimi istifadə oluna bilər.

KINETIC PROPERTIES OF InSb-FeSb EUTECTIC COMPOSITE

I.Kh.MAMMADOV

The electrical and thermal properties of the InSb-FeSb eutectic composite have been investigated in the temperature range 80-450K and a magnetic field up to 0.65T. Anisotropy of the kinetic parameters was observed for the mutual directions of the current, magnetic field and inclusions. It was found that the interphase zone along with inclusions played a significant role in the anisotropy of electrical conductivity. It was shown that the InSb-FeSb eutectic composite is a promising material for thermostable resistance sensors and heat flux detectors at room temperature and magnetic field 0.6T.