Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 7, с. 489 – 496

Межслойное обменное взаимодействие в пленках $Fe_3Si/Ge/Fe_3Si$

И. Г. Важенина[+1)], *И. А. Яковлев*[+], *С. Н. Варнаков*[*+], *М. В. Рауцкий*[+], *Р. С. Исхаков*[+]

[+]*Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра "Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН", 660036 Красноярск, Россия*

[*]*Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр Сибирского отделения РАН", 660036 Красноярск, Россия*

Поступила в редакцию 3 февраля 2026 г.
После переработки 28 февраля 2026 г.
Принята к публикации 4 марта 2026 г.

Межслойное обменное взаимодействие трехслойных эпитаксиальных пленок $Fe_3Si/Ge/Fe_3Si$ исследовано методом ферромагнитного резонанса. Образцы с технологической толщиной слоя Ge t_{Ge} 1 и 4 нм были получены напылением из отдельных термических источников методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Величина эффективной константы межслойного обменного взаимодействия J_{12} является положительной и равной 0.7 эрг/см^2 при $t_{Ge} = 1$ нм, а при $t_{Ge} = 4$ нм становится отрицательной и равной по модулю 0.18 эрг/см^2. Таким образом, в исследуемых структурах в зависимости от толщины промежуточного слоя реализуется либо ферромагнитный ($t_{Ge} = 1$ нм), либо антиферромагнитный ($t_{Ge} = 4$ нм) тип межслойного обменного взаимодействия.

DOI: 10.7868/S3034576626040075

1. Введение. Открытие явления межслойного обменного взаимодействия [1] между тонкими ферромагнитными пленками, разделенными промежуточным металлическим слоем, стало отправной точкой многочисленных исследований многослойных структур. Одним из основных установленных фактов является зависимость величины эффективной константы межслойного обменного взаимодействия J_{12} от толщины прослойки t_{Sp}. На сегодняшний день можно выделить два варианта изменения J_{12} при варьировании толщины промежуточного слоя. Первый вариант, часто наблюдаемый при металлической слабомагнитной прослойке, представлен в виде затухающей осциллирующей функции, изменяющей знак [2–5]. Подобная функциональная зависимость $J_{12}(t_{Sp})$ может объясняться волновой природой спин- поляризованных электронов проводимости в промежуточном слое, механизм связи между которыми может описываться по-разному: косвенное обменное взаимодействие (РККИ теория) [6–8]; модель свободных электронов [9]; обменное соединение, основанное на пространственном ограничении дырок в промежуточном слое [10], а также модель Андерсона, учитывающая при описании толщиной зависимости J_{12} магнитное поведение изолированных примесей [11]. Определение периода осцилляции $J_{12}(t_{Sp})$ для каждого из указанных подходов базируется на концепции комплексной Ферми поверхности [12]. Однако применение того же теоретического подхода [12] при диэлектрической или полупроводниковой прослойках предсказывает второй вариант зависимости $J_{12}(t_{Sp})$ в виде экспоненциально затухающей функции без осцилляций, наблюдаемой многими научными группами [13–16]. Отметим, что экспоненциальная зависимость предсказывается и наблюдается и для металлических прослоек [17]. Возможными механизмами для осуществления данного типа зависимости $J_{12}(t_{Sp})$ рассматривается туннелирование электронных волн [12, 18] и механизм сверхобмена [19].

Исследования трехслойных пленок при различных материалах прослойки (металл или полупроводник) ведутся с одинаковой интенсивностью. Интерес к системам с полупроводниковой прослойкой обусловлен ожиданием более широких возможностей по управлению величиной и типом связи межслойного обменного взаимодействия через манипулирование свойствами прослойки (например, через изменение концентрации основных носителей заряда). Значительное количество работ представляют исследования трехслойных систем с Fe в качестве материала ферромагнитных слоев и с Si в качестве материала промежуточного слоя. Существенным результатом можно отметить экспериментально установленную затухающую экспоненциальную зависимость $J_{12}(t_{Sp})$ через промежуточный слой силицида железа [14–16, 20, 21], которая преимущественно форми-

1)e-mail: irina-vazhenina@mail.ru

руется при малых номинальных толщинах слоя Si [22]. При этом величина J_{12} достигает высоких значений, вплоть до 5 эрг/см^2, и является отрицательной (антиферромагнитный тип межслойного обменного взаимодействия). Осциллирующий вид функции $J_{12}(t_{Sp})$ со сменой знака при аморфном Si в виде материала промежуточного слоя и температурах 40 и 150 K наблюдался в [23, 24], а величина J_{12} имела весьма малые значения (порядка 5.10^{-3} эрг/см^2). Отдельно следует отметить осциллирующую зависимость $J_{12}(t_{Sp})$ при отрицательных значениях величины межслойного обменного взаимодействия, полученную для пленки $Fe/Fe_{0.56}Si_{0.44}/Fe$ как при низкой (20 K), так и при комнатной температуре [25] и пленки Fe/FeSi/Si/FeSi/Fe [26].

Исследование трехслойной структуры при использовании иного полупроводникового материала, помимо Si, в качестве промежуточного слоя было выполнено в [27]. Промежуточный слой был синтезирован в виде чередующихся слоев Si и Ge, $J_{12}(t_{Sp})$ описывалась авторами как затухающая экспоненциальная функция, которая принимала отрицательные значения, а максимальная величина межслойного обменного взаимодействия была порядка 1.5 эрг/см^2.

Предварительные результаты исследования структуры и магнитных характеристик трехслойной пленки $Fe_{3+x}Si_{1-x}/Ge/Fe_{3+x}Si_{1-x}$ с технологической толщиной слоя Ge 4.0 нм были представлены нашей группой в [28]. По отработанной методике синтеза был получен образец со структурой ферромагнитных слоев силицида железа, близких к стехиометрическому Fe_3Si. Более детальный анализ СВЧ-спектров, выполненный при сопоставлении расчетной кривой с экспериментальными значениями резонансных полей, измеренных при различных углах между нормалью к плоскости пленки и внешним постоянным магнитным полем, позволил сделать заключение о наличии антиферромагнитного межслойного взаимодействия между крайними ферромагнитными слоями силицида железа. Целью данной работы являлось исследование влияния толщины промежуточного слоя трехслойных пленок $Fe_3Si/Ge/Fe_3Si$ на величину и знак константы межслойного обменного взаимодействия. Отметим, что представляемые результаты также расширяют номенклатуру охарактеризованных полупроводниковых материалов, которые возможно использовать в качестве промежуточного слоя в трехслойных системах.

2. Методы эксперимента. Трехслойные пленки $Fe_3Si/Ge/Fe_3Si$, а также реперный образец Ge/Fe_3Si с одним ферромагнитным слоем, покрытый германием, были синтезированы на подложках Si(111) 7×7 методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в условиях сверхвысокого вакуума напылением из отдельных термических источников Fe, Si и Ge типа эффузионной ячейки Кнудсена с тиглями из нитрида бора. Отдельные слои многослойных пленок были получены в едином цикле последовательным испарением из разных источников в течение требуемого времени, что определяло технологическую толщину индивидуального ферромагнитного или полупроводникового слоя. Детальное изложение технологических приемов подготовки подложки и синтеза пленочных структур методом МЛЭ представлено в [28, 29]. Варьирование времени осаждения германия позволило получить трехслойные структуры с разной технологической толщиной германия t_{Ge}: 1 и 4 нм. Слои силицида Fe_3Si были получены по отработанной технологии совместным осаждением железа и кремния в атомарном соотношении 3:1 заданной толщиной 25 нм при $t_{\mathrm{Ge}}=1$ нм и 10 нм при $t_{\mathrm{Ge}}=4$ нм. Температура подложки на протяжении всего синтеза была не более 300 °C. Для реперного образца Ge/Fe_3Si толщина слоя германия, напыленного поверх силицида, составляла 2 нм, а толщина Fe_3Si была равна 25 нм.

Динамические магнитные исследования были выполнены методами ферромагнитного (ФМР) и спин-волнового (СВР) резонанса. Измерение СВЧ-спектров проводилось при комнатной температуре в X-диапазоне (частота накачки резонатора $f=9.48$ ГГц) и изменении направления постоянного магнитного поля по углу θ_H относительно нормали к плоскости пленки и по углу ϕ_H в плоскости пленки на спектрометре ELEXSYS E580 (изготовитель Bruker, Германия).

3. Результаты и обсуждение. Кристаллическая структура крайних ферромагнитных слоев трехслойных пленок была установлена по результатам структурных исследований, выполненных методом дифракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ) *in situ* при синтезе индивидуальных слоев, и принималась во внимание при интерпретации и использовании теоретических моделей (для симметричных и несимметричных систем) для описания угловых зависимостей положений резонансных полей пиков поглощения в регистрируемых СВЧ спектрах. На экспериментально наблюдаемых дифрактограммах от каждого слоя наблюдаются рефлексы-тяжи, образующие упорядоченные сетки, что говорит об эпитаксиальном росте многослойных пленок (рис. 1 при $t_{\mathrm{Ge}}=1$ нм и [28] при $t_{\mathrm{Ge}}=4$ нм). Исследование методом ДОБЭ позволило сделать ряд выво-

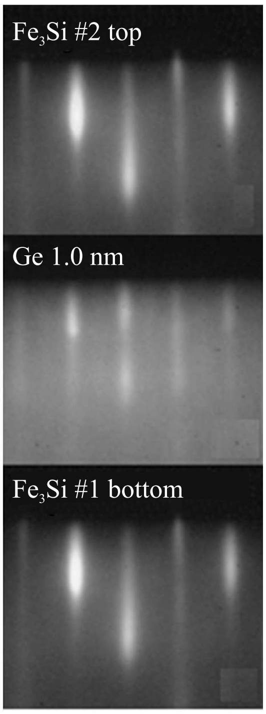

Рис. 1. Картина ДОБЭ, измеренная в направлении оси зоны $[11\text{-}2]_{Si}$ подложки

дов. Во-первых, крайние ферромагнитные слои силицида железа являются монокристаллическими с одинаковой кристаллической решеткой, на основании чего будут рассматриваться как симметричные при анализе СВЧ спектров. Во-вторых, промежуточный слой представляет собой тройной твердый раствор железо–кремний–германий, имеющий разную кристаллическую решетку в зависимости от технологической толщины германия t_{Ge}.

ФМР спектр реперного образца Ge/Fe_3Si при $\theta_H = 90^\circ$ описывается лоренциановой функцией, резонансным полем 765 Э, шириной линии 13 Э и g-фактором, равным 2 (и, как следствие, гиромагнитное соотношение $\gamma = 1.758 \cdot 10^7$ Гц/Э).

СВЧ-спектры при $\theta_H = 90^\circ$ и $\phi_H = 0^\circ$ трехслойных пленок $Fe_3Si/Ge/Fe_3Si$ демонстрируют два пика с разной интенсивностью (рис. 2a и b). Угловые зависимости значений положения резонансного поля H_{res} (рис. 3), полученные как результат измерения образцов при варьировании по углу θ_H, позволили идентифицировать данные пики как акустическую и оптическую моды, возбуждаемые вследствие наличия межслойной обменной связи между крайними ферромагнитными слоями Fe_3Si через слабомагнитную прослойку. Акустическая мода соответствует высокочастотным компонентам двух векторов намагниченности, резонирующих в фазе (ее полевая координата определяется внутренним полем). Оптическая мода соответствует высокочастотным компонентам двух векторов намагниченности, резонирующих в противофазе. Взаимное расположение пиков позволяет установить тип упорядочения векторов намагниченности в соседних слоях – ферромагнитное или антиферромагнитное. В первом случае величина межслойного обменного взаимодействия J_{12} положительна, и оптическая мода наблюдается в более низких полях по отношению к акустической моде, что в нашем случае реализуется при $t_{\mathrm{Ge}} = 1$ нм (рис. 2a). Во втором случае, при $J_{12} < 0$, оптическая мода наблюдается при более высоких полях, чем акустическая мода, и подобный тип взаимодействия наблюдается при $t_{\mathrm{Ge}} = 4$ нм (рис. 2b).

Решение уравнения общей энергии трехслойной системы позволяет по известным значениям резонансных полей акустической и оптической мод, регистрируемых в спектре ФМР для планарных систем, с высокой точностью определить также величину межслойного обменного взаимодействия [30–33]. Общая энергия системы в условиях ферромагнитного резонанса (возбуждение однородной моды намагниченности) определяется выражением

$$\begin{aligned} E = E_Z + E_E + E_{\mathrm{anis}} = \\ -tM_1H[\sin\theta_H \sin\theta_1 \cos(\phi_H - \phi_1) + \\ + \cos\theta_H \cos\theta_1] - \\ - tM_2H[\sin\theta_H \sin\theta_2 \cos(\phi_H - \phi_2) + \\ + \cos\theta_H \cos\theta_2] - \\ - J_1[\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos\theta_1 \cos\theta_2] - \\ - J_2[\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos\theta_1 \cos\theta_2]^2 + \\ + 2\pi t(M_1^2 \cos^2\theta_1 + M_2^2 \cos^2\theta_2), \end{aligned} \qquad (1)$$

где E_Z – энергия Зеемана, учтенная в виде первых двух слагаемых, E_E – обменная энергия между индивидуальными ферромагнитными слоями, определяемая 3-м и 4-м слагаемым, и E_{anis} – энергия анизотропии, учтенная в последнем слагаемом уравнения. M_1 и M_2 – величина намагниченности насыщения M_S нижнего и верхнего ферромагнитного слоя, соответственно, с толщиной t, а θ_1, θ_2, ϕ_1, ϕ_2 – полярные и азимутальный углы вектора намагниченности в этих слоях. H, θ_H и ϕ_H – величина, полярный и азимутальные углы внешнего постоянного магнитного поля. J_1 и J_2 – линейная и квадратичная константы межслойной обменной связи. Учет отдельных слагаемых и упрощение вида (1) был выполнен, во-первых, на основе результата анализа угловых зависимостей значений положений резонансного поля H_{res} при варьировании по углу ϕ_H (рис. 4).

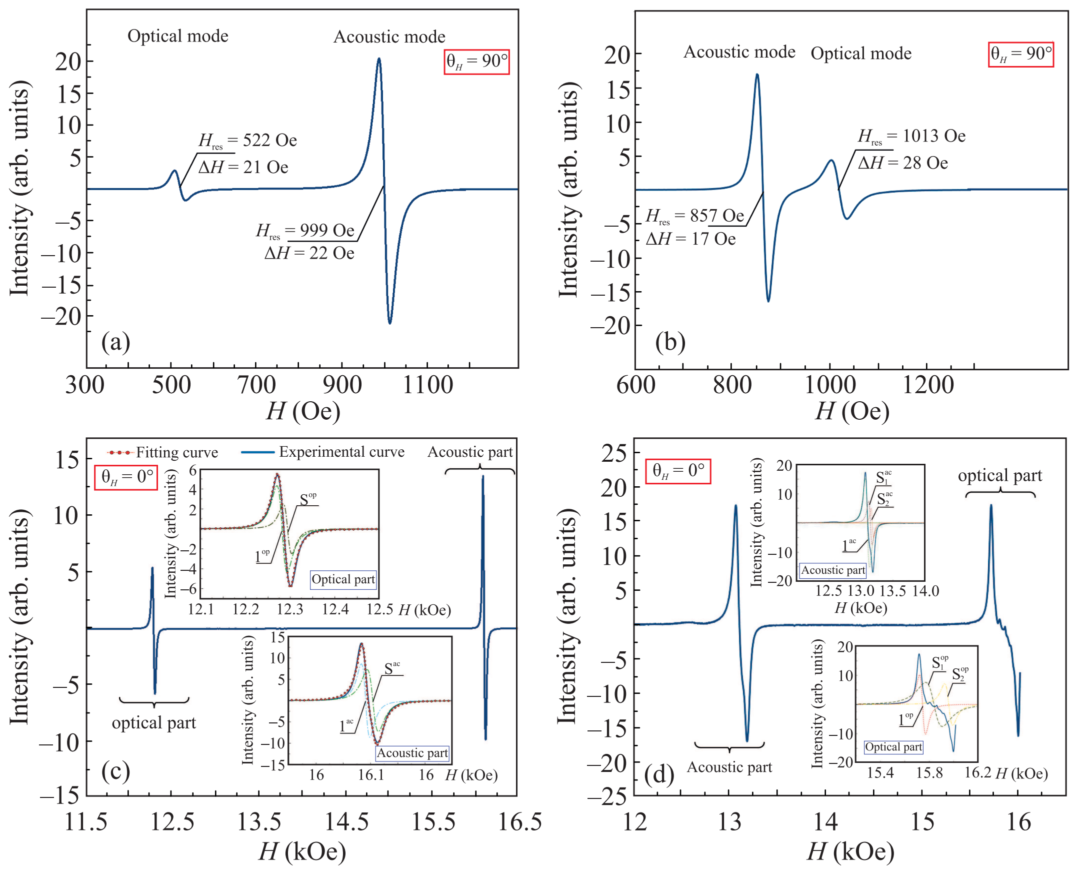

Рис. 2. (Цветной онлайн) Экспериментальные СВЧ-спектры трехслойных пленок $Fe_3Si/Ge/Fe_3Si$ при технологической толщине прослойки Ge 1 нм (a), (c) и 4 нм (b), (d), измеренные при варьировании угла θ_H и температуре 295 K

Зависимости $H_{\text{res}}(\phi_H)$ демонстрируют одноосную анизотропию малой величины для акустического пика 31 и 3 Э при $t_{\text{Ge}} = 1$ и 4 нм, соответственно, и для оптического пика 28 и 37 Э при t_{Ge} 1 и 4 нм, соответственно. Также, принимая во внимание вид зависимостей $H_{\text{res}}(\phi_H)$, полагаем $J_2 = 0$ эрг/см^2. Тогда обменная энергия между индивидуальными ферромагнитными слоями учитывается введением дополнительного поля H_E, которое обуславливает сдвиг резонансных полей (частот) акустического и оптического пиков и может быть вычислена из формулы [34]

$$|H_E| = 2J_{12}/(M_{\text{eff}}t), \tag{2}$$

где M_{eff} – эффективная намагниченность отдельного ферромагнитного слоя, J_{12} – эффективная константа межслойной обменной связи, t – толщина ферромагнитного слоя.

Вторым фактором, принимаемым во внимание при использовании (1), было определение типа возбуждаемых мод – однородная или неоднородная, и, как следствие, диапазона углов θ_H, в пределах которого данные моды возбуждаются. Регистрируемые пики в СВЧ спектрах (акустический и оптический) при изменении ориентации образца относительно внешнего магнитного поля по углу θ_H были определены как возбуждаемые однородные моды в диапазонах углов $-80° \leq \theta_H \leq -10°$ и $10° \leq \leq \theta_H \leq 90°$ и неоднородные моды в диапазоне углов $-10° \leq \theta_H \leq 10°$ при любом значении t_{Ge}. Идентификация типа регистрируемой моды – однородная (наблюдаемая в условиях ФМР) или неоднородная (при СВР), для всех образцов была выполнена с учетом угловой зависимости интенсивности $dI/dH(\theta_H)$ [35], а также условия наблюдения поверхностной моды [36–42] при различных толщинах ферромагнитного слоя. Отдельные поглощения на кривой СВР спектра были определены как реализация поверхностной моды S и первой обменной стоячей моды как для акустического, так и оптического пиков (пример идентифицированных спектров при $\theta_H = 0°$ представлен на рис. 2). Отметим, что наблюдаемые поверхностные моды (рис. 2c и d), которые располагаются в спектре в полях, больших поля первой объ-

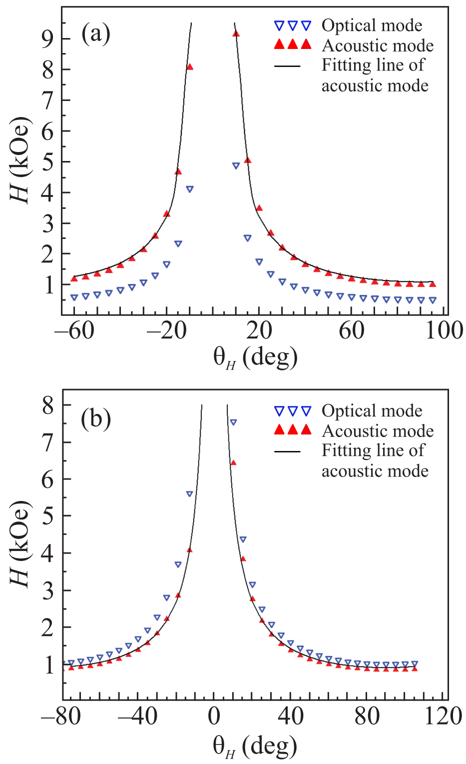

Рис. 3. (Цветной онлайн) Угловые зависимости положений резонансных полей, совмещенные с расчетной кривой, полученной для акустической моды, при $t_{\mathrm{Ge}} = 1$ нм (a) и 4 нм (b)

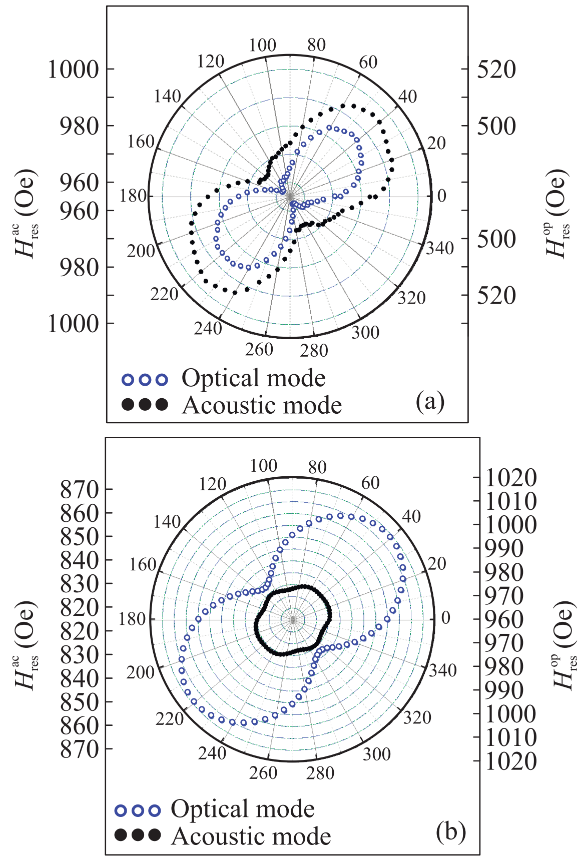

Рис. 4. (Цветной онлайн) Угловые зависимости позиций резонансных полей акустической и оптической моды при варьировании по углу ϕ_H для трехслойных систем с $t_{\mathrm{Ge}} = 1$ нм (a) и 4 нм (b)

емной моды, свидетельствуют о реализации на одной (либо обеих в случае наблюдения двух пиков поглощения в полях, больших поля первой объемной моды) поверхности граничных условий типа "легкая плоскость" ($K_S < 0$, где K_S – константа поверхностной анизотропии) [42]. Созданные в процессе синтеза граничные условия обуславливают наличие неоднородных мод (в виде первой стоячей моды и поверхностной моды) и описываются полем поверхностной анизотропии H_S, которое оказывает влияние на сдвиг резонансных полей в диапазоне углов $-10° \le \theta_H \le 10°$. Учитывая влияние H_S, величина поля H_E при расчете J_{12} по (2) определялась при $\theta_H = 90°$.

Общая энергия системы с учетом представленных выше уточнений может быть записана

$$E = -2tM_S H[\sin\theta_H \sin\theta_{1,2}\cos(\phi_H - \phi_{1,2}) + \\ + \cos\theta_H \cos\theta_{1,2}] + tM_S H_{anis}\sin^2\theta_{1,2} - \\ - J_{12}[\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos\theta_1\cos\theta_2], \quad (3)$$

где H_{anis} включает размагничивающее поле $-4\pi M_S$, поле перпендикулярной анизотропии $H_\perp$ и поле поверхностной анизотропии H_S [34]. Измеренные угловые зависимости экспериментальных значений положений резонансных полей H_{res} однородной моды при различных углах θ_H были сопоставлены с расчетной кривой, что позволило оценить величины M_{eff} и поля перпендикулярной анизотропии $H_\perp$ отдельных ферромагнитных слоев в каждой исследуемой пленке. Процедура получения расчетных значений резонансного поля в зависимости от θ_H представлена в [35] для однослойной однородной пленки и в [43] для трехслойной обменно-связанной пленки. Выполненная нами оценка величин M_{eff} и $H_\perp$ считалась приемлемой, если расхождение между экспериментальными и расчетными значениями составляло не более 5 %. Магнитные параметры однослойной пленки и трехслойных пленок $Fe_3Si/Ge/Fe_3Si$ при технологической толщине слоя Ge $t_{\mathrm{Ge}} = 1$ и 4 нм представлены в таблице 1. Величина M_{eff} трехслойных пленок в достаточной мере совпадает с M_{eff} однослойной пленки, что свидетельствует о высокой степени сходства не только структурных, но и магнитных параметров ферромагнитных слоев Fe_3Si, полученных в разных технологических циклах. Большее отклонение M_{eff} при $t_{\text{Ge}} = 4$ нм от значения данного параметра однослойной пленки может объясняться образованием иного интерфейса на внутренних границах вследствие большей диффузии между слоями Fe_3Si и слоем Ge, что отражается в образовании дополнительных поверхностных мод в спектре СВР (рис. 2d).

Таблица 1. Параметры пленок, определенные из ФМР измерений

Sample	M_{eff}, Gs	$H_\perp$, Oe	J_{12}, erg/cm^2
Single layer film Ge/Fe_3Si	1130	0	
Fe_3Si/Ge/Fe_3Si $t_{\text{Ge}} = 1$ nm	1197	50	0.7
Fe_3Si/Ge/Fe_3Si $t_{\text{Ge}} = 4$ nm	900	118	−0.18

4. Заключение. Выполнено исследование динамическими методами (ферромагнитным и спин-волновым резонансом) трехслойных пленок Fe_3Si/Ge/Fe_3Si, синтезированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложки монокристаллического Si(111), при технологической толщине слоя Ge $t_{\text{Ge}} = 1$ и 4 нм. Регистрируемые СВЧ-спектры при изменении угла между нормалью к плоскости пленки и приложенным внешним постоянным магнитным полем позволяют сделать вывод о наличии межслойного обменного взаимодействия между крайними ферромагнитными слоями силицида железа, характеризующегося эффективной константой J_{12}. Величина и знак J_{12} определяются технологической толщиной слоя Ge t_{Ge}. Ферромагнитный тип межслойного взаимодействия ($J_{12} > 0$) реализуется при $t_{\text{Ge}} = 1$ нм: $J_{12} = 0.7$ эрг/см^2. Антиферромагнитный тип ($J_{12} < 0$) наблюдается при $t_{\text{Ge}} = 4$ нм, а величина $J_{12} = 0.18$ эрг/см^2, в четыре раза меньше.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках научной тематики Госзадания Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”. Авторы выражают благодарность Красноярскому региональному центру коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук” за предоставленное оборудование для проведения измерений.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. P. Grunberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, and H. Sowers, “Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers”, Phys. Rev. Lett. **57**, 2442 (1986).
2. Y. Zhang, G. Wu, Z. Ji, X. Chen, Q. Y. Jin, and Z. Zhang, “Significant and nonmonotonic dynamic magnetic damping in asymmetric Co-Fe/Ru/Co-Fe trilayers”, Phys. Rev. Appl. **17**, 034033 (2022).
3. T. McKinnon, B. Heinrich, and E. Girt, “Spacer layer thickness and temperature dependence of interlayer exchange coupling in Co/Ru/Co trilayer structures”, Phys. Rev. B **104**, 024422 (2021).
4. M. T. Johnson, S. T. Purcell, N. W. E. McGee, R. Coehoorn, J. aan de Stegge, and W. Hoving, “Structural dependence of the oscillatory exchange interaction across Cu layers”, Phys. Rev. Lett. **68**, 2688 (1992).
5. S. T. Purcell, M. T. Johnson, N. W. E. McGee, R. Coehoorn, and W. Hoving, “Two-monolayer oscillations in the antiferromagnetic exchange coupling through Mn in Fe/Mn/Fe sandwich structures”, Phys. Rev. B **45**, 13064 (1992).
6. M. A. Ruderman and C. Kittel, “Indirect Exchange Coupling of Nuclear Magnetic Moments by Conduction Electrons”, Phys. Rev. **96**, 99 (1954).
7. T. Kasuya, “A Theory of Metallic Ferro- and Antiferromagnetism on Zener’s Model”, Prog. Theor. Phys. **16**, 45 (1956).
8. K. Yosida, “Magnetic Properties of Cu-Mn Alloys”, Phys. Rev. **106**, 893 (1957).
9. R. Coehoorn, “Period of oscillatory exchange interactions in Co/Cu and Fe/Cu multilayer systems”, Phys. Rev. B **44**, 9331 (1991).
10. D. M. Edwards, J. Mathon, R. B. Muniz, and M. S. Phan, “Oscillations of the exchange in magnetic multilayers as an analog of de Haas – van Alphen effect”, Phys. Rev. Lett. **67**, 493 (1991).
11. Y. Wang, P. M. Levy, and J. L. Fry, “Interlayer magnetic coupling in Fe/Cr multilayered structures”, Phys. Rev. Lett. **65**, 2732 (1990).
12. P. Bruno, “Theory of interlayer magnetic coupling”, Phys. Rev. B **52**, 411 (1995).
13. E. E. Fullerton, J. E. Mattson, S. R. Lee, C. H. Sowers, Y. Y. Huang, G. Felcher, S. D. Bader, and F. T. Parker, “Non-oscillatory antiferromagnetic coupling in sputtered Fe/Si superlattices”, JMMM **117**, L301 (1992).
14. J. J. de Vries, J. Kohlhepp, F. J. A. den Broeder, R. Coehoorn, R. Jungblut, A. Reinders, and W. J. M. de Jonge, “Exponential Dependence of the Interlayer Exchange Coupling on the Spacer Thickness in MBE-grown Fe/SiFe/Fe Sandwiches”, Phys. Rev. Lett. **78**, 3023 (1997).

15. B. Croonenborghs, F. M. Almeida, C. L'abbé, R. R. Gareev, M. Rots, A. Vantomme, and J. Meersschaut, "Interlayer coupling across semimetallic iron monosilicide", Phys. Rev. B **71**, 024410 (2005).
16. D. E. Burgler, R. R. Gareev, L. L. Pohlmann, H. Braak, M. Buchmeier, M. Luysberg, R. Schreiber, P. A. Grünberg, "Interlayer exchange coupling across epitaxial Si spacers", Mol. Phys. Reports **40**, 13 (2004).
17. Y. Wei, S. Akansel, T. Thersleff, I. Harward, R. Brucas, M. Ranjbar, S. Jana, P. Lansaker, Y. Pogoryelov, R. K. Dumas, K. Leifer, O. Karis, J. Åkerman, Z. Celinski, and P. Svedlindh, "Exponentially decaying magnetic coupling in sputtered thin film FeNi/Cu/FeCo trilayers", Appl. Phys. Lett. **106**, 042405 (2015).
18. J. C. Slonczewski, "Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by a tunneling barrier", Phys. Rev. B **39**, 6995 (1989).
19. Z.-P. Shi, P. M. Levy, and J. L. Fry, "Antiferromagnetic Bias in the Interlayer Magnetic Coupling", Europhys. Lett. **26**, 473 (1994).
20. B. K. Kuanr, M. Buchmeier, D. E. Buergler, P. Gruenberg, R. Camley, and Z. Celinski, "Dynamic and static measurements on epitaxial Fe/Si/Fe", J. Vac. Sci. Technol. A **21**, 1157 (2003).
21. R. R. Gareev, D. E. Búrgler, M. Buchmeier, R. Schreiber, and P. Grünberg, "Very strong interlayer exchange coupling in epitaxial $Fe/Fe_{1-x}Si_x/Fe$ trilayers ($x = 0.4-1.0$)", JMMM **240**, 235 (2002).
22. M. Hansen and K. Anderko, *Constitution of Binary Alloys* (McGraw-Hil, N.Y., 1958).
23. S. Toscano, B. Briner, H. Hopster, and M. Landolt, "Exchange-coupling between ferromagnets through a non-metallic amorphous spacer-layer", JMMM **114**, L6 (1992).
24. B. Briner and M. Landolt, "Intrinsic and Heat-Induced Exchange Coupling through Amorphous Silicon", Phys. Rev. Lett. **73**, 340 (1994).
25. R. R. Gareev, D. E. BÚrgler, M. Buchmeier, D. Olligs, R. Schreiber, and P. Grünberg, "Metallic-Type Oscillatory Interlayer Exchange Coupling across an Epitaxial FeSi Spacer", Phys. Rev. Lett. **87**, 157202 (2001).
26. F. Stromberg, S. Bedanta, C. Antoniak, W. Keune, and H. Wende, "FeSi diffusion barriers in Fe/FeSi/Si/FeSi/Fe multilayers and oscillatory antiferromagnetic exchange coupling", J. Phys. Condens. Matter. **20**, 425205 (2008).
27. R. R. Gareev, D. E. Bürgler, R. Schreiber, H. Braak, M. Buchmeier, and P. A. Grünberg, "Antiferromagnetic interlayer exchange coupling across epitaxial, Ge-containing spacers", Appl. Phys. Lett. **83**, 1806 (2003).
28. A. S. Tarasov, I. A. Tarasov, I. A. Yakovlev et al. (Collaboration), "Asymmetric Interfaces in Epitaxial Off-Stoichiometric $Fe_{3+x}Si_{1-x}/Ge/Fe_{3+x}Si_{1-x}$ Hybrid Structures: Effect on Magnetic and Electric Transport Properties", Nanomaterials **12**, 131 (2021).
29. I. A. Yakovlev, S. N. Varnakov, B. A. Belyaev, S. M. Zharkov, M. S. Molokeev, I. A. Tarasov, and S. G. Ovchinnikov, "Study of the structural and magnetic characteristics of epitaxial $Fe_3Si/Si(111)$ films", JETP Lett. **99**, 527 (2014).
30. A. Layadi and J. O. Artman, "Ferromagnetic resonance in a coupled two-layer system", J. Magn. Magn. Mater. **92**, 143 (1990).
31. P. J. H. Bloemen, H. W. van Kesteren, H. J. M. Swagten, and W. J. M. de Jonge, "Oscillatory interlayer exchange coupling in Co/Ru multilayers and bilayers", Phys. Rev. B **50**, 13505 (1994).
32. Y. Ando, H. Koizumi, and T. Miyazaki, "Exchange coupling energy determined by ferromagnetic resonance in $Ni_{80}Fe_{20}/Cu$ multilayer films", JMMM **166**, 75 (1997).
33. B. Heinrich, J. F. Cochran, M. Kowalewski, J. Kirschner, Z. Celinski, A. S. Arrott, and K. Myrtle, "Magnetic anisotropies and exchange coupling in ultrathin fcc Co(001) structures", Phys. Rev. B **44**, 9348 (1991).
34. Z. Zhang, L. Zhou, P. E. Wigen, and K. Ounadjela, "Angular dependence of ferromagnetic resonance in exchange-coupled Co/Ru/Co trilayer structures", Phys. Rev. B **50**, 6094 (1994).
35. I. G. Vazhenina, R. S. Iskhakov, and V. Y. Yakovchuk, "Characteristics of Angular Dependences of Parameters of Ferromagnetic and Spin-Wave Resonance Spectra of Magnetic Films", Phys. Met. Metallogr. **123**, 1084 (2022).
36. R. S. Iskhakov, S. V. Stolyar, M. V. Chizhik, and L. A. Chekanova, "Spin-wave resonance in multilayer films (one-dimensional magnon crystals). Identification rules", JETP Lett. **94**, 301 (2011).
37. В. М. Соколов, Б. А. Тавгер, "Роль поверхностных волн в спин-волновом резонансе в пленках", ФТТ **10**, 1793 (1968) [V. M. Sokolov and B. A. Tavger, "Rol' poverkhnostnykh voln v spin-volnovom rezonanse v plenkakh", Fizika tverdogo tela **10**, 1793 (1968)].
38. Ю. А. Корчагин, Р. Г. Хлебопрос, Н. С. Чистяков, "Спектр спин-волнового резонанса в тонком ферромагнитном слое со смешанными граничными условиями", ФТТ **14**, 2121 (1972) [Yu. A. Korchagin, R. G. Khlebopros, and N. S. Chistyakov, "Spektr spin-volnovogo rezonansa v tonkom ferromagnitnom sloe so smeshannymi granichnymi usloviyami", Fizika tverdogo tela **14**, 2121 (1972)].
39. Ю. А. Корчагин, Р. Г. Хлебопрос, Н. С. Чистяков, "Спин-волновой резонанс в магнитных пленках с дополнительными поверхностными слоями", ФТТ **34**, 1303 (1972) [Yu. A. Korchagin, R. G. Khlebopros, and N. S. Chistyakov, "Spin-volnovoj rezonans v magnitnykh plenkakh s dopolnitel'nymi poverkhnostnymi sloyami", Fizika tverdogo tela **34**, 1303 (1972)].
40. Н. М. Саланский, М. Ш. Ерухимов, *Физические свойства и применение магнитных пленок* (Наука, Новосибирск, 1975) [N. M. Salanskij and

M. Sh. Erukhimov, *Fizicheskie svojstva i primenenie magnitnykh plenok* (Nauka, Novosibirsk, 1975)].

41. А. Г. Гуревич, *Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках* (Главная редакция физико-математической литературы "Наука", М., 1973) [A. G. Gurevich, *Magnitnyj rezonans v ferritakh i antiferomagnetikakh* (Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury "Nauka", Moscow, 1973)] [in Russian].

42. I. G. Vazhenina, R. S. Iskhakov, and L. A. Chekanova, "Spin-Wave Resonance in Chemically Deposited Fe-Ni Films: Measuring the Spin-Wave Stiffness and Surface Anisotropy Constant", Phys. Solid State **60**, 292 (2018).

43. P. E. Wigen, Z. Zhang, L. Zhou, M. Ye, and J. A. Cowen, "The dispersion relation in antiparallel coupled ferromagnetic films", J. Appl. Phys. **73**, 6338 (1993).