

05,13

## Зависимость спектра спин-волновых возбуждений магнетонного кристалла от поля подмагничивания

© А.В. Кожевников<sup>1</sup>, С.Л. Высоцкий<sup>1,2,¶</sup>, Г.М. Дудко<sup>1</sup>, Ю.В. Хивинцев<sup>1</sup>, Ю.В. Никулин<sup>1</sup>, Ю.А. Филимонов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

¶ E-mail: vysotsl@gmail.com

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Экспериментально и численно исследован спектр спиновых волн (СВ) касательно намагниченных пленок железоиттриевого граната (ЖИГ) с поверхностной метаструктурой в виде решеток из вытравленных канавок с периодом  $\Lambda$ , близким к толщине пленок  $d$  ( $\Lambda \sim d$ ). Обнаружено, что в спектре сигнала, отраженного от расположенного на пленке ЖИГ микрополоскового преобразователя шириной  $w \gg d, \Lambda$ , присутствуют линии поглощения, связанные с возбуждением СВ поверхностной метаструктуры. В случае, когда магнитное поле  $H$  и преобразователь ориентированы вдоль канавок, линии поглощения метаструктуры располагаются на частотах  $f^*$  вблизи коротковолновой границы спектра поверхностной магнитоэлектронной волны Дэймона–Эшбаха  $f_s$ . Показано, что  $f^*$  линейно зависит от  $H$ , что может быть использовано для разработки датчиков магнитного поля. Результаты измерений зависимостей  $f^*(H)$  находятся в качественном соответствии с результатами микромагнитного моделирования.

**Ключевые слова:** магнитоэлектронные волны, одномерная решетка, поверхностная структура, датчик магнитного поля.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52812.05NN

### 1. Введение

Интерес к исследованию спиновых волн в магнитных периодических структурах (магнетонных кристаллах) связан с изучением особенностей формирования спектра спин-волновых возбуждений, обусловленных неоднородностью основного состояния, зависимостью ширины запрещенных зон в спектре спиновых волн от геометрических и магнитных параметров периодической структуры, наличия структурных дефектов, а также зависимостью условий формирования спектра от соотношения вкладов диполь-дипольного и обменного взаимодействий [1–8].

Помимо фундаментального интереса к их свойствам, магнетонные кристаллы (МК) могут использоваться для разработки устройств обработки информации на СВЧ [9–12], а также, например, для создания магнитных сенсоров [13–17]. В последнем случае используется эффект формирования в спектре распространяющихся в МК спиновых волн запрещенной зоны на частоте резонанса Брэгга и зависимость резонансной частоты этой зоны от величины поля подмагничивания.

Следует отметить, что наиболее часто при экспериментальных исследованиях свойств МК на СВЧ используют пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), на поверхности которой с помощью прецизионного травления [11,18,19] или периодической металлизации [13,15] формируется одномерная или двумерная периодическая

структура. Акцент в исследованиях МК делается на исследование параметров брэгговских полос непропускания в частотных зависимостях коэффициента передачи распространяющихся спиновых волн, при этом величина  $\Lambda$  выбирается из условия  $\Lambda > \lambda_{\min}$ , где  $\lambda_{\min}$  — минимальная длина волны наблюдаемой в эксперименте СВ. При уменьшении периода поверхностной структуры до величин  $\Lambda < \lambda_{\min}$ , она становится субволновой (по отношению к распространяющимся СВ) и может трактоваться как двумерный аналог метаматериала — метаповерхность [20,21]. Распространение СВ в пленках ЖИГ с метаповерхностью обладает рядом особенностей по сравнению как с плоской пленкой, так и с МК [20,21]

Целью данной работы является исследование особенностей спектра пленок ЖИГ с поверхностной метаструктурой, связанных с наличием собственных возбуждений метаповерхности, и выяснение перспективы построения датчиков магнитного поля на их основе.

### 2. Экспериментальные образцы, методика эксперимента и результаты измерений

Для изготовления образцов использовалась пленка ЖИГ, эпитаксиально выращенная на подложке гадолиний-галлиевого граната толщиной 0.5 мм с кристалло-

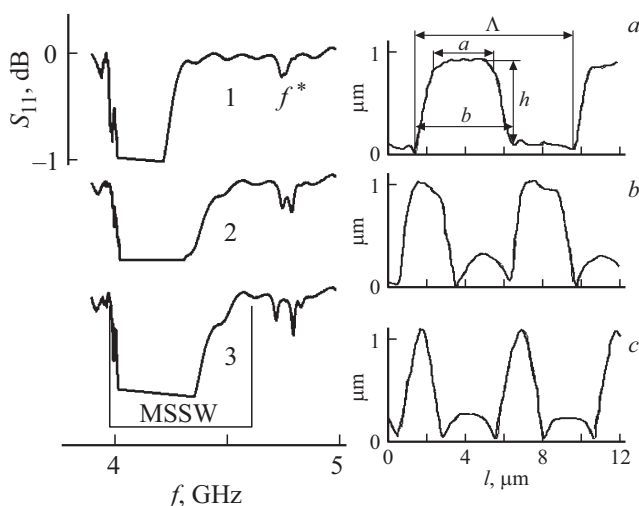
Параметры нескольких исследованных образцов

№	$\Lambda, \mu\text{m}$	$a, \mu\text{m}$	$b, \mu\text{m}$	$h, \mu\text{m}$
1	8	3	5	0.9
2	6	2	3	1
3	5	0	2	1.1

графической ориентацией (111) с толщиной  $d = 7.7 \mu\text{m}$ , намагниченностью насыщения  $4\pi M = 1750 \text{ G}$ . Для формирования поверхностных решеток из канавок использовались технологии фотолитографии и ионного травления. При этом из-за низкой селективности травления профили канавок заметно отличались от прямоугольного. В таблице представлены параметры нескольких исследованных образцов (см. также вставку *a* к рис. 1).

Для исследования спектра собственных возбуждений мы использовали подход, аналогичный [22]. Образцы располагались на микрополосковой антенне шириной  $w = 50 \mu\text{m}$  так, чтобы канавки были ориентированы вдоль антенны, и намагничивались в плоскости пленки ЖИГ параллельно антенне. На антенну подавалась СВЧ мощность с анализатора цепей Agilent E5071C-480. Исследовалась частотная зависимость отраженной от антенны мощности  $S_{11}(f)$  от величины поля подмагничивания  $H$ .

На рис. 1 кривая 1 отвечает  $S_{11}(f)$  для образца № 1 при  $H = 760 \text{ Oe}$ . Уменьшение  $S_{11}(f)$  в интервале частот, обозначенном на рис. 1 SMSW (surface magnetostatic waves), отвечает возбуждению поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ). Нижняя частотная граница интервала соответствует длинноволновой границе спектра ПМСВ  $f_0 = \sqrt{f_H \cdot (f_H + f_m)}$ , тогда как



**Рис. 1.** Вид зависимостей  $S_{11}(f)$  для образцов № 1, 2 и 3 (см. таблицу) при  $H = 760 \text{ Oe}$ . Цифры у кривых соответствуют номерам образцов. Масштаб по вертикали для всех кривых одинаков. На вставках *a*–показаны полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа профили поверхностной структуры для образцов № 1, 2 и 3 соответственно.

верхняя  $f_{\lambda_{\min}}$  определяется из дисперсионного уравнения [23]:

$$f_{-}^2 = f_0^2 + \frac{f_m^2}{4} (1 - e^{-2kd}), \quad (1)$$

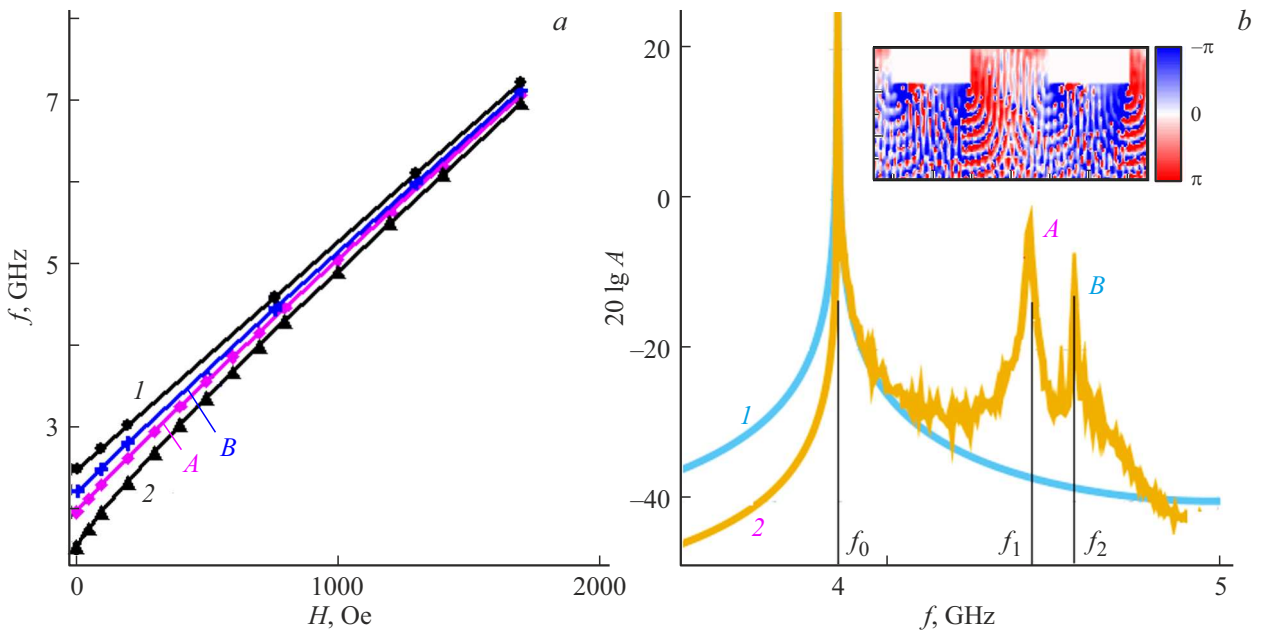
$f_H = \gamma H$ ,  $f_m = \gamma 4\pi M$ ,  $k$  — волновой вектор ПМСВ,  $\gamma \approx 2.8 \text{ MHz/Oe}$  — гиромагнитное отношение в ЖИГ, при величине  $k = \pi/w$ , соответствующей минимальной длине волны ПМСВ, возбуждаемой антенной шириной  $w$ . Кроме того, в зависимости  $S_{11}(f)$  звездочкой отмечен узкополосный провал с центральной частотой  $f^*$ , которая оказалась близка к верхней частотной границе области существования ПМСВ  $f_n = f_H + f_m/2$  [23]. В пленках без поверхностной метаструктуры такой провал отсутствовал. Эта особенность наблюдалась для всех исследованных образцов, при этом провал мог демонстрировать „перетяжку“ (кривая 2) или разбиваться на два отдельных пика поглощения (кривая 3). Из сопоставления полученных с помощью сканирующего зондового микроскопа профилей образцов и вида зависимостей  $S_{11}(f)$  можно сделать вывод о том, что чем более форма выступа отклоняется от прямоугольной в сторону треугольной, тем более ярко выражено разделение провала на два отдельных пика. Оказалось, что центральная частота одиночного пика  $f^*$  (или частоты двух отдельных пиков) линейно зависят от величины поля подмагничивания. Для примера на рис. 2, *a* зависимость  $f^*(H)$  в интервале  $H$  от 1 Oe до 1.7 kOe представлена линией 1.

Мы провели измерения зависимости  $S_{11}(f)$  в условиях, когда ось канавки отклонялась от направления поля  $H$ . На рис. 3, *a* кривые 1 и 2 представляют эти зависимости, полученные при  $H = 47 \text{ Oe}$  для  $\varphi = 0$  (кривая 1) и  $\varphi = 20^\circ$  (кривая 2), где  $\varphi$  — угол между осью канавки поверхностной структуры и направлением поля подмагничивания. Видно, что с увеличением угла  $\varphi$  характерные частоты исследованных провалов уменьшаются, что характерно для поведения коротковолновой границы спектра ПМСВ.

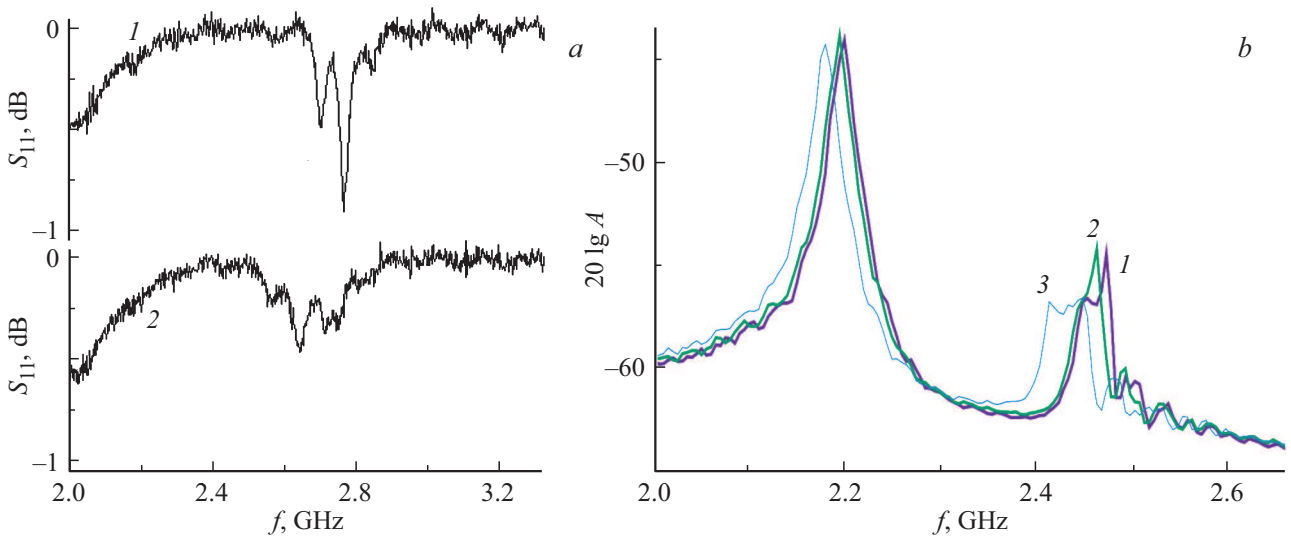
### 3. Результаты микромагнитного моделирования

С помощью микромагнитного моделирования пакетом OOMMF [24] и обработки данных программой Semargl [25] получены спектры релаксационных колебаний в гладких пленках ЖИГ и субволновых решетках с параметрами, отвечающими экспериментально исследованным структурам. При моделировании шаг элементарной ячейки в сечении (OXZ) структуры, перпендикулярной направлению микрополосок, составлял  $50 \times 50 \text{ nm}$ , а в направлении (OY) вдоль микрополосок — бралась одна ячейка в 1 см (аналог двумерной геометрии). В направлении (OX) применялись периодические граничные условия.

На рис. 2, *b* показаны результаты моделирования спектров релаксационных колебаний в гладких пленках



**Рис. 2.** *a*) Зависимость от величины  $H$  экспериментально измеренной частоты  $f^*$  (линия 1), рассчитанных частот  $f_1$  и  $f_2$  (линии A и B), и рассчитанной частоты брэгговского резонанса при  $\Lambda = 100 \mu\text{m}$  (линия 2). *b*) Частотная зависимость спектральной плотности Фурье-амплитуды для случаев ПМСВ в пленке ЖИГ (кривая 1) и в пленке ЖИГ с субволновой поверхностной структурой (кривая 2).  $H = 760$  Ое. На вставке показано фрагмент рассчитанного для частоты  $f_1 = 4.44$  GHz, отвечающей максимуму пика A, распределения фаз спиновых возбуждений.



**Рис. 3.** *a*) Вид зависимости  $S_{11}(f)$  для образца № 2 при  $\varphi = 0$  (кривая 1) и  $20^\circ$  (кривая 2),  $H = 47$  Ое. *b*) Частотная зависимость спектральной плотности Фурье-амплитуды для случаев распространения ПМСВ в пленке ЖИГ с субволновой поверхностной структурой при  $\varphi = 0, 5^\circ$  и  $10^\circ$  (кривые 1, 2 и 3 соответственно).  $H = 10$  Ое.

ЖИГ (кривая 1) и субволновой решетке (кривая 2) с периодом  $8 \mu\text{m}$ , шириной и глубиной канавки  $4$  и  $1 \mu\text{m}$ , соответственно, при  $H = 760$  Ое. Видно, что в обоих случаях в спектрах наблюдается пик на частоте  $f_0$ , соответствующей квазиоднородному резонансу, а при наличии поверхностной структуры возникают еще два обособленных пика на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , обозначенных на рис. 2, *b* A и B. На рис. 2, *a* линиями A и B

представлены зависимости рассчитанных для различных величин  $H$  частот  $f_1$  и  $f_2$ . Видно, что графики зависимостей  $f_1(H)$  и  $f_2(H)$  представляют собой прямые линии с незначительно отличающимися углами наклона к оси абсцисс, при этом рассчитанные частоты  $f_1$  и  $f_2$  близки к экспериментально измеренной  $f^*$ .

На рис. 3, *b* представлены результаты моделирования спектров релаксационных колебаний в пленке

ЖИГ с поверхностной метаструктурой, полученные при  $H = 10$  Ое для  $\varphi = 0, 5^\circ$  и  $10^\circ$  (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Видно, что с увеличением угла  $\varphi$  характерные частоты исследованных провалов уменьшаются, что качественно согласуется с результатами эксперимента.

На вставке к рис. 2, *b* показан фрагмент рассчитанного для частоты 4.44 GHz, отвечающей максимуму пика *A*, распределения фазы спиновых возбуждений по сечению структуры. Расчет проведен для  $\Lambda = 8 \mu\text{m}$ ,  $a = 4 \mu\text{m}$ ,  $b = 4 \mu\text{m}$ ,  $h = 0.8 \mu\text{m}$ . Видно, что по ширине выступа поверхностной структуры и области пленки под ним наблюдается периодическое чередование цвета красный–белый–синий, что соответствует изменению фазы на  $2\pi$  и может трактоваться как некий размерный резонанс спиновых волн с длиной порядка долей микрона. Мы предполагаем, что в эксперименте возбуждение столь коротких волн с помощью широкой микрополоски может осуществляться (хотя и не очень эффективно) по механизму, предложенному в [26].

#### 4. Возможность практического применения

Следует отметить, что близкая к линейной зависимость  $f^*(H)$  может служить преимуществом для применения на практике аналогично использованию магнитных кристаллов для разработки датчиков магнитного поля [13–17]. Дело в том, что в случае МК контролируется зависимость от  $H$  центральной частоты брэгговской полосы непропускания  $f_B$ , связанной, например для ПМСВ, с волновым числом СВ  $k$  дисперсионным соотношением (1). Для примера на рис. 2, *a* кривая 2 отвечает зависимости частоты первого брэгговского резонанса  $f_B$  в пленке с выбранными параметрами и периодом решетки  $\Lambda = 100 \mu\text{m}$ . Видно, что для фиксированной величины  $k$  зависимость  $f_B(H)$  существенно отличается от линейной в области малых магнитных полей.

#### 5. Заключение

В частотной зависимости величины мощности, отраженной от микрополосковой антенны, на которой располагается пленка железо-иттриевого граната с метаповерхностью, обнаружена узкая область уменьшения отраженной мощности, центральная частота которой линейно зависит от величины поля подмагничивания  $H$  в интервале от нескольких Ое до 1.7 кОе. Эта зависимость может быть полезна для разработки сенсоров магнитного поля. Результаты проведенных измерений находятся в качественном соответствии с результатами микромагнитного моделирования, которые позволяют трактовать обнаруженную особенность в отраженной мощности как результат размерных резонансов спиновых волн в элементах метаповерхности.

#### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ № 20-07-00973, № 20-57-00008 и № 20-07-00968).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] J.O. Vasseur, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, H. Pushkarski. Phys. Rev. B **54**, 1043 (1996).
- [2] M. Krawczyk, H. Puzzkarski. Acta Phys. Pol. A **93**, 805 (1998).
- [3] M. Krawczyk, H. Puzzkarski. Phys. Rev. B **77**, 054437-12 (2008).
- [4] V.V. Kruglyak, A.N. Kuchko. Physics B **339**, 130 (2003).
- [5] В.В. Кругляк, А.Н. Кучко, В.И. Фиохино. ФТТ **46**, 842 (2004).
- [6] V.S. Tkachenko, V.V. Kruglyak, A.N. Kuchko. J. Magn. Magn. Mater. **307**, 48 (2006).
- [7] H. Pushkarski, M. Krawczyk, J.-C. S. Levy. J. Appl. Phys. **101**, 024326 (2007).
- [8] А.Н. Кучко, М.Л. Соколовский, В.В. Кругляк. ФММ **101**, 565 (2006).
- [9] S. Neusser, D. Grundler. Adv. Mater. **21**, 1 (2009).
- [10] A.A. Serga, A.V. Chumak, B. Hillebrands. J.Phys. D **43**, 264002 (2010).
- [11] A.V. Ustinov, A.V. Drozdovskii, В.А. Kalinikos. J. Appl. Phys. **96**, 142513 (2010).
- [12] M. Krawczyk, D. Grundler. J. Phys.: Condens. Matter. **26**, 12, 123202 (2014).
- [13] M. Inoue, A. Baryshev, H. Takagi, P.B. Lim, K. Hatafuku, J. Noda, K. Togo. Appl. Phys. Lett. **98**, 132511 (2011).
- [14] R.G. Kryshal, A.V. Medved. Appl. Phys. Lett. **100**, 192410 (2012).
- [15] P. Talbot, A. Fessant, J. Gieraltowski. Proc. Eng. **120**, 1241 (2015).
- [16] S. Atalay, A.O. Kaya, V.S. Kolat, H. Gencer, T. Izgi. J. Supercond. Nov. Magn. **28**, 2071 (2015).
- [17] H. Takagi, J. Noda, T. Ueno, N. Kanazawa, Y. Nakamura, M. Inoue. Electron. Commun. Jpn **97**, 11 (2014).
- [18] R.L. Carter, C.V. Smith, J.M. Owens. IEEE Trans. Magn. MAG-16, 1159 (1980).
- [19] Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, Л.В. Животовский, А.А. Климов, Ч. Цай, Ф. Тайед, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов. Письма в ЖЭТФ **77**, 670 (2003).
- [20] S.L. Vysotskii, Y.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, G.M. Dudko, A.V. Kozhevnikov, S.A. Nikitov, N.N. Novitskii, A.I. Stognij, Y.A. Filimonov. IEEE Magn. Lett. **8**, 3706104 (2017).
- [21] S. Vysotskii, G. Dudko, V. Sakharov, Y. Khivintsev, Y. Filimonov, N. Novitskii, A. Stognij, S. Nikitov. Acta Phys. Pol. A **133**, 508 (2018).
- [22] С.Л. Высоцкий, С.А. Никитов, Ю.А. Филимонов, Е.С. Павлов. Радиотехника и электроника **55**, 855 (2010).

- [23] А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. Магнитные колебания и волны. Физматлит, М.(1994). 464 с.
- [24] M. Donahue, D. Porter. OOMMF User's Guide, Version 1.0.Ed. In Interagency Report NISTIR 6376. Boulder: Nat. Inst. of Standards and Technology. (1999).
- [25] M. Dvornik. Magnonics: from fundamentals to applications. Ch.: Micromagnetic Simulations in Magnonics / Eds M. Dvornik, Y. Au, V.V. Kruglyak. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg **125**, 101 (2013).
- [26] Haiming Yu, G. Duerr, R. Huber, M. Bahr, T. Schwarze, F. Brandl, D. Grundler. Nature Commun. **4**, 2702 (2013).
- [27] R.W. Damon, J.R. Eshbach. J. Phys. Chem. Solids. **19**, 30 (1961).

*Редактор Д.В. Жуманов*