

УДК 537.611.44

ФОКУСИРОВКА И КАУСТИКА МАГНОНОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ С ГЦК-СТРУКТУРОЙ

© 2019 г. С. М. Бахарев^{1, 2, *}, С. П. Савченко¹, А. П. Танкеев^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

“Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, Екатеринбург, Россия

*E-mail: bakharevsm@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Определены направления фокусировки обменных спиновых волн в кристаллах с ГЦК-решеткой типа каменной соли. На примере ферромагнитных полупроводников EuO и EuS показано, что в таких системах для реализации фокусировки не требуется внешнее магнитное поле и размерные эффекты. Установлены направления в кристалле, а также необходимые условия для формирования каустики магнонов.

DOI: 10.1134/S0367676519070068

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей фокусировки и каустики спиновых волн в ферромагнитных кристаллах с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК) типа каменной соли. В качестве примера рассмотрим кристаллы EuO и EuS. Указанные соединения классифицируются как ферромагнитные полупроводники, главная особенность которых состоит в сильном взаимодействии локальных магнитных моментов и электронов проводимости. Отсюда следует возможность управления воздействием на магнитную подсистему электронной спиновой системой. Это обстоятельство открывает перспективы широкого практического применения магнитных полупроводников в современной электронике [1–3].

В системах, в которых частоты собственных колебаний зависят от направления волнового вектора, групповая и фазовая скорости не коллинеарны. Это приводит к появлению преимущественных направлений в кристалле, вдоль которых происходит распространение изучаемых волн (или фокусировка). Особый интерес представляют точки, в которых кривизна изоэнергетической поверхности обращается в нуль. В этих точках резко возрастает амплитуда спиновых волн, т.е. формируется каустика магнонов [4, 5].

Впервые фокусировка и связанные с ней эффекты исследовались на фонах при распространении тепловых импульсов в упруго анизотропных кристаллах [5–8]. В этих исследованиях

отмечалась резкая анизотропия пространственного распределения потока энергии акустических колебаний, которая напрямую связывалась с явлением фокусировки фононов.

Наша задача состоит в исследовании особенностей распространения обменных спиновых волн в ферромагнетиках с ГЦК-решеткой. Для этого необходимо, во-первых, определить интервал частот, в котором реализуются условия фокусировки магнонов. Во-вторых, найти направления в кристалле и необходимые условия для формирования каустики. Необходимо также отследить изменение условий фокусировки магнонов при изменении величины и знака параметра обменного взаимодействия (обменного интеграла) со вторыми соседями.

Ограничимся рассмотрением области температур ниже 4.2 К. Как показано в работах [10, 11], в этой области в кристаллах EuO и EuS постоянные обменного взаимодействия слабо зависят от температуры. В таких системах взаимодействие спина иона Eu^{2+} с ближайшими (nn) и следующими (nnn) ионами Eu^{2+} описывается гейзенберговским гамильтонианом [10, 11]:

$$H = -J_1 \sum_{nn} \vec{S}_0 \vec{S}_{nn} - J_2 \sum_{nnn} \vec{S}_0 \vec{S}_{nnn}, \quad (1)$$

где J_1 и J_2 – постоянные обменного взаимодействия для ближайших и следующих за ними соседей; \vec{S}_0 , \vec{S}_{nn} и \vec{S}_{nnn} – спины в начальной, в nn и nnn позициях соответственно. Для этого гамильтониана спектр спиновых волн имеет вид:

$$\omega(\vec{q}) = 2\omega_E \times \left[2 \left(3 - \cos\left(\frac{aq_x}{2}\right)\cos\left(\frac{aq_z}{2}\right) - \cos\left(\frac{aq_y}{2}\right)\cos\left(\frac{aq_z}{2}\right) - \cos\left(\frac{aq_x}{2}\right)\cos\left(\frac{aq_y}{2}\right) \right) + \xi(3 - \cos(aq_x) - \cos(aq_y) - \cos(aq_z)) \right], \quad (2)$$

где $\omega_E = 2SJ_1/\hbar$, $\xi = J_2/J_1$, a – постоянная решетки, q_i – проекция волнового вектора \vec{q} на соответствующую декартову ось. Отметим, что в длинноволновом приближении ($aq \ll 1$) частота спиновых волн не зависит от направления волнового вектора, и фокусировка отсутствует. Она наблюдается лишь для волновых векторов во второй половине зоны Бриллюэна, когда $aq \geq \pi$.

Направления фокусировки и дефокусировки магновов определяются из структуры изочастотных поверхностей, поскольку групповая скорость \vec{V} перпендикулярна этой поверхности в заданной точке и определяет поток магновов (см. рис. 1). Для количественной оценки фокусировки и определения точек каустики в плоскостях $\{100\}$ и $\{110\}$ был рассчитан коэффициент усиления потока магновов $A(\vec{q})$ для заданного направления волнового вектора \vec{q} , который характеризует интенсивность потока магновов относительно изотропного слу-

чая [7, 9]. Поскольку коэффициент усиления обратно пропорционален гауссовой кривизне изочастотной поверхности ($A(\vec{q}) \sim 1/K$) [5], то для определения точек каустики (точки, в которых A имеет сингулярность) необходимо найти направления в кристалле, при которых $K = 0$.

Как видно из рис. 1, для кристалла EuS (параметр $\xi = -0.5$, см. [10, 11]) групповые скорости сходятся к направлениям $[001]$ и $[110]$, т.е. имеет место фокусировка магновов, а в направлении $[111]$ – дефокусировка. В кристаллах EuO (параметр $\xi = 0.2$, см. [10, 11]) спиновые волны фокусируются в направлениях $[110]$, а в направлениях $[001]$ и $[111]$ – дефокусируются.

Расчет коэффициента A показал, что эффект фокусировки спиновых волн зависит от знака и величины параметра обменного взаимодействия магнитного момента со вторыми соседями ξ . Анализ показал, что при смене знака параметра ξ с положительного на отрицательный в направлении $[100]$ дефокусировка сменяется фокусировкой, а в направлении $[111]$ – наоборот. В частности, для $\xi = 0$ магновы фокусируются в направлениях $[100]$ и $[110]$; для $\xi = 0.8$ – в направлениях $[110]$ и $[111]$; для $\xi = -0.8$ – в направлении $[100]$. Расчет показал, что в EuO каустика отсутствует (см. рис. 2), а в кристаллах EuS в окрестности на-

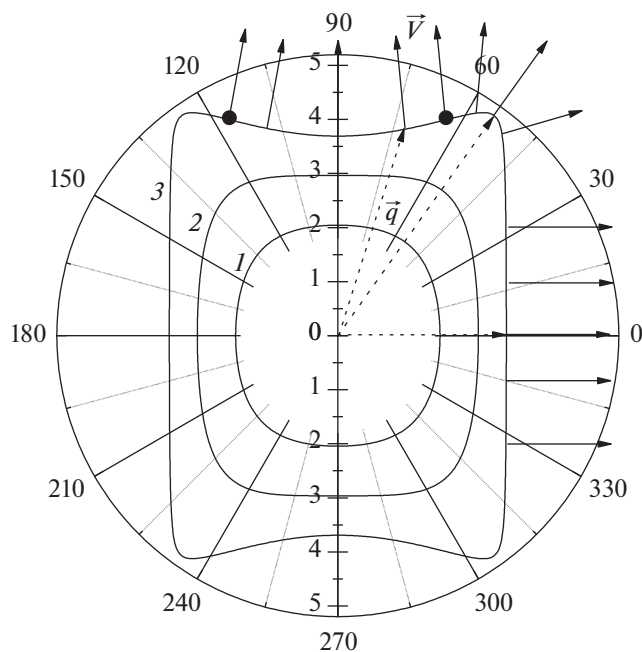


Рис. 1. Сечения поверхностей $a\vec{q}$ в ГЦК решетке плоскостью $\{110\}$ с параметром $\xi = -0.5$ (EuS) для частот $\omega = 2\omega_E$ (кривые 1), $\omega = 4\omega_E$ (кривые 2) и $\omega = 5.9\omega_E$ (кривые 3). Для EuS $v_E = \omega_E/2\pi = 29.2$ ГГц. Угол θ задает направление волнового вектора \vec{q} и отсчитывается от положительного направления оси Z (оси четвертого порядка). Жирные точки указывают на точки нулевой кривизны.

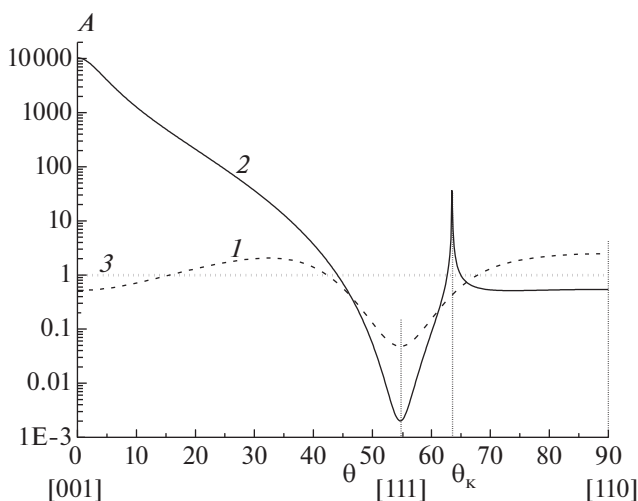


Рис. 2. Угловые зависимости коэффициента усиления $A(\theta)$ спиновых волн в плоскости $\{110\}$ в кристаллах EuO (кривая 1) при частоте $\omega = 14.3\omega_E$ и EuS (кривая 2) при частоте $\omega = 5.9\omega_E$. Кривая 3 – изотропный случай ($aq \ll 1$).

правлений [001] и [111] $A(\theta)$ имеет сингулярность, и формируется каустика магнонов. Так в плоскости {110} A имеет особенность при $\theta = \theta_k \approx 63.6^\circ$ (см. рис. 2).

Таким образом, в кристалле EuO фокусировка имеет место в направлениях [110] и [111], а дефокусировка — в направлениях типа [100]. В кристаллах EuS картина фокусировки качественно отличается: фокусировка магнонов наблюдается в направлении [100], в направлении [111] — дефокусировка, а в окрестности направления [110] формируется каустика магнонов. Полученные результаты по фокусировке и каустике магнонов в кристаллах EuO и EuS найдут применение в спинтронике.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Функция” АААА-А19-119012990095-0 и проекту № 32-1.1.3.5 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН согласно контракту Минобрнауки № 14.Z50.31.0025, а также гранта РФФИ (проект № 18-32-00139-мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нагаев Э.Л.* // УФН. 1975. Т. 117. № 3. С. 437.
2. *Altendorf S.G., Reisner A., Tam B. et al.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 97. Art. № 165422.
3. *Borukhovich A.S., Ignat'eva N.I., Yanushkevich K.I. et al.* // JETP Lett. 2009. V. 89. № 4. P. 191.
4. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.
5. *Every A.G.* // Phys. Rev. B. 1981. V. 24. P. 3456.
6. *Taylor B., Maris H.J., Elbaum C.* // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 23. P. 416.
7. *Maris H.J.* // J. Acoust. Soc. Am. 1971. V. 50. P. 812.
8. *Кулеев И.Г., Кулеев И.И., Бахарев С.М., Устинов В.В.* Фокусировка фононов и фононный транспорт в монокристаллических наноструктурах. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2018. 254 с.
9. *Бахарев С.М., Савченко С.П., Танкеев А.П.* // ФТТ. 2018. Т. 60. № 12. С. 2358.
10. *Dietrich O.W., Henderson A.J., Meyer H.* // Phys. Rev. B. 1975. V. 12. P. 2844.
11. *Passell L., Dietrich O.W., Als-Nielsen J.* // Phys. Rev. B. 1976. V. 14. P. 4897.