

# Излучение шумоподобных спин-волновых пакетов при трехмагнонных процессах распада и кинетической неустойчивости волн в ферромагнитной пленке

С. В. Гришин, Ю. П. Шараевский<sup>1)</sup>

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

Поступила в редакцию 4 декабря 2008 г.

Представлены результаты экспериментального исследования особенностей спин-волнового излучения из ферромагнитной пленки в направлении распространения поверхностной магнитостатической волны при различных уровнях мощности входного сигнала. Было зафиксировано излучение в виде двух шумоподобных спин-волновых пакетов вблизи частоты, соответствующей половинному значению частоты сигнала накачки. Указанное излучение обусловлено трехмагнонными процессами распада поверхностной магнитостатической волны и кинетической неустойчивостью спиновых волн.

PACS: 75.30.Ds, 85.70.Ge

Явления, связанные с параметрическим возбуждением спиновых волн (СВ) при трехмагнонных (ЗМ) процессах распада магнитостатических волн (МСВ) в ферромагнитных пленках, к настоящему времени являются достаточно хорошо изученными как теоретически, так и экспериментально [1–13]. Для таких процессов справедливы следующие законы сохранения:

$$f_p = f_1 + f_2, \quad \mathbf{k}_p = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2, \quad (1)$$

где  $f_p$  и  $\mathbf{k}_p$  – частота и волновой вектор накачки (МСВ);  $f_1, f_2$  и  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$  – частоты и волновые векторы параметрически возбужденных СВ, соответственно.

Интерес к распадным процессам (1) обусловлен прежде всего тем, что эти процессы проявляются при достаточно низких уровнях мощности накачки ( $\sim 1$  мкВт) [8–13], приводят к нелинейным потерям [6, 7, 10] и к стохастической автомодуляции сигнала, генерируемого в кольцевых автоколебательных системах при запороговых уровнях мощности накачки [14].

Известны два возможных механизма распадной неустойчивости МСВ, когда выполняются условия (1): 1) распад МСВ на СВ с большими значениями волновых чисел  $k_1$  и  $k_2$  ( $k_1, k_2 > 10^5$  см<sup>-1</sup>); 2) распад поверхностной МСВ (ПМСВ) на магнитодипольные СВ (обратные объемные МСВ-ОМСВ или ПМСВ) с малыми значениями волновых чисел ( $k_1, k_2 < 10^3$  см<sup>-1</sup>) [5, 7, 8, 12, 13]. Кроме того, было установлено, что параметрически возбужденные СВ в запороговом режиме сами могут распадаться на вторичные СВ (ВСВ), в результате чего в пленке разви-

вается кинетическая неустойчивость (КН) [15–19], которая в определенной степени является аналогом кинетической неустойчивости, обнаруженной в объемных образцах ферромагнетиков [20, 21]. Следует подчеркнуть, что экспериментальное исследование указанных выше явлений в ферромагнитных пленках проводилось, как правило, на основе рассмотрения амплитудно-частотных характеристик и спектров мощности сигналов в окрестности частоты МСВ накачки  $f_p$ . Можно указать лишь работы [8, 17, 19], в которых экспериментально было зарегистрировано спин-волновое излучение при ЗМ процессах распада вблизи частоты  $f_p/2$  [8, 19] или в результате развития КН на частотах возбуждаемых ВСВ [17, 19].

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования спин-волнового излучения из ферромагнитной пленки в условиях ЗМ распадной неустойчивости ПМСВ в зависимости от уровня мощности входного сигнала. Указанное излучение регистрировалось в направлении распространения ПМСВ (в режиме “на проход”) на частотах  $\sim f_p/2$ . Отмечаются некоторые особенности такого излучения. В частности, зафиксировано излучение в виде двух ярко выраженных шумоподобных спин-волновых пакетов, и обсуждаются возможные механизмы, обуславливающие наблюдаемое спин-волновое излучение.

Исследования проводились на макете линии задержки, которая состояла из двух закороченных с одного конца и разнесенных между собой на расстояние  $l=3$  мм полосковых проводников (входного и выходного) шириной  $w=70$  мкм, под которыми располагалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ),

<sup>1)</sup>e-mail: sharaevskyy@info.sgu.ru

находившаяся в непосредственном контакте с ними и имевшая следующие параметры: геометрические размеры  $6 \times 14 \times 0.04$  мм, намагниченность насыщения  $4\pi M_0 = 1680$  Гс, параметр потерь  $2\Delta H = 0.69$  Э. Внешнее постоянное магнитное поле  $H_0 = 198$  Э прикладывалось касательно к поверхности пленки, в которой возбуждалась ПМСВ, распространяющаяся перпендикулярно к направлению  $H_0$  (схема линии задержки показана на вставке к рис.1).

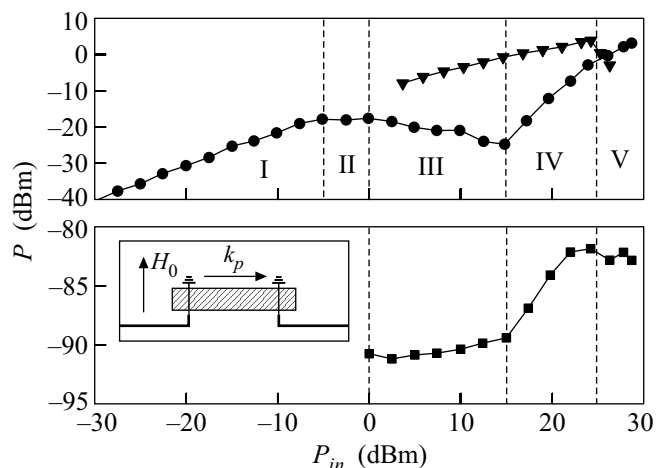


Рис.1. Зависимости выходной мощности  $P_{out}$  (кружки), мощности ПМСВ накачки  $P_p$  (треугольники), измеренные на частоте  $f_p$ , а также интегральной мощности спин-волнового излучения  $P_{int}$  (квадратики), измеренной на частотах  $\sim f_p/2$ , от уровня входной мощности  $P_{in}$ .

В качестве источника СВЧ сигнала, подаваемого на вход линии задержки, использовался клистронный генератор, работающий в диапазоне частот  $1.78 \div 2.56$  ГГц. Для увеличения уровня мощности СВЧ сигнала использовался транзисторный усилитель мощности, подключенный через ферритовый вентиль к выходу указанного генератора. Усилитель имел в полосе частот  $2 \div 4$  ГГц коэффициент усиления в линейном режиме  $K \sim 34$  дБ и величину выходной мощности в режиме насыщения  $P_{sat} \sim 31 \div 32$  дБмВт. Выход усилителя мощности был подключен ко входу линии задержки на ПМСВ через ферритовый циркулятор, что позволяло не только развязать эти устройства между собой, но и исследовать сигнал, отраженный от входного проводника линии задержки. СВЧ сигнал, прошедший через линию передачи на ПМСВ (режим “на проход”), поступал на вход анализатора спектра серии ESA-E E4402B, работающего в диапазоне частот  $9$  кГц  $\div 3$  ГГц. Данный анализатор спектра способен различать сигналы с уровнем мощности  $\sim -167$  дБмВт при ширине полосы обзора  $1$  Гц,

что являлось важным для регистрации спин-волнового излучения, имеющего достаточно низкую интенсивность на выходе линии задержки.

На рис.1 приведена динамическая характеристика исследуемой линии передачи (зависимость выходной мощности  $P_{out}$  от уровня входной мощности  $P_{in}$ ), измеренная на частоте ПМСВ накачки  $f_p = 2000$  МГц с волновым вектором  $k_p = 28$  см $^{-1}$ , а также зависимости от уровня  $P_{in}$  мощности ПМСВ накачки  $P_p$  и интегральной мощности спин-волнового излучения  $P_{int}$ , измеренных на частотах  $\sim f_p/2$ . Исходя из представленных на рис.1 данных, можно выделить пять характерных областей относительно мощности  $P_{in}$ : область I ( $P_{in} < -5$  дБмВт), в которой наблюдается практически линейная зависимость  $P_{out}$  от  $P_{in}$  и не регистрируется спин-волновое излучение на частотах  $\sim f_p/2$ ; область II ( $-5$  дБмВт  $\leq P_{in} < 0$  дБмВт) характеризуется насыщением уровня  $P_{out}$ ; область III ( $0$  дБмВт  $\leq P_{in} < +15$  дБмВт), в которой на динамической характеристике линии передачи наблюдается падающий участок, а на частотах  $\sim f_p/2$  регистрируется спин-волновое излучение низкой интенсивности и практически постоянного уровня интегральной мощности; область IV ( $+15$  дБмВт  $\leq P_{in} < +25$  дБмВт) характеризуется резким увеличением уровней  $P_{out}$  и  $P_{int}$  с ростом  $P_{in}$ ; область V ( $P_{in} \geq +25$  дБмВт), в которой наблюдается уменьшение уровня  $P_p$  и насыщение уровня  $P_{int}$ , а также дальнейший рост уровня мощности  $P_{out}$  с увеличением  $P_{in}$ .

На рис.2 приведены спектры мощности спин-волнового излучения на частотах  $\sim f_p/2$  и сигнала, прошедшего через линию задержки на ПМСВ на частоте  $f_p$ , при уровнях  $P_{in}$ , соответствующих областям III–V на рис.1. Отметим, что в области I излучение на выходе линии наблюдается только на частоте  $f_p$ , а в области II в спектре выходного сигнала появляются сателлиты первого типа<sup>3)</sup> [6–8], равноотстоящие от частоты  $f_p$  на  $\Delta f_1 \sim \pm 55$  МГц. В этом интервале значений  $P_{in}$  наблюдается небольшое уширение шумового пьедестала у спектральной линии основного сигнала, что может быть обусловлено, на наш взгляд, 3М процессами слияния первичных спиновых волн, параметрически возбужденными ПМСВ накачкой.

Как следует из представленных на рис.2 результатов, при уровнях  $P_{in}$ , соответствующих началу падающего участка на динамической характеристике

<sup>2)</sup> Мощность ПМСВ накачки определялась по уровню мощности отраженного сигнала с использованием методики, предложенной в [9].

<sup>3)</sup> Наличие в спектре сигнала сателлитов первого типа наблюдается только в областях II–IV.

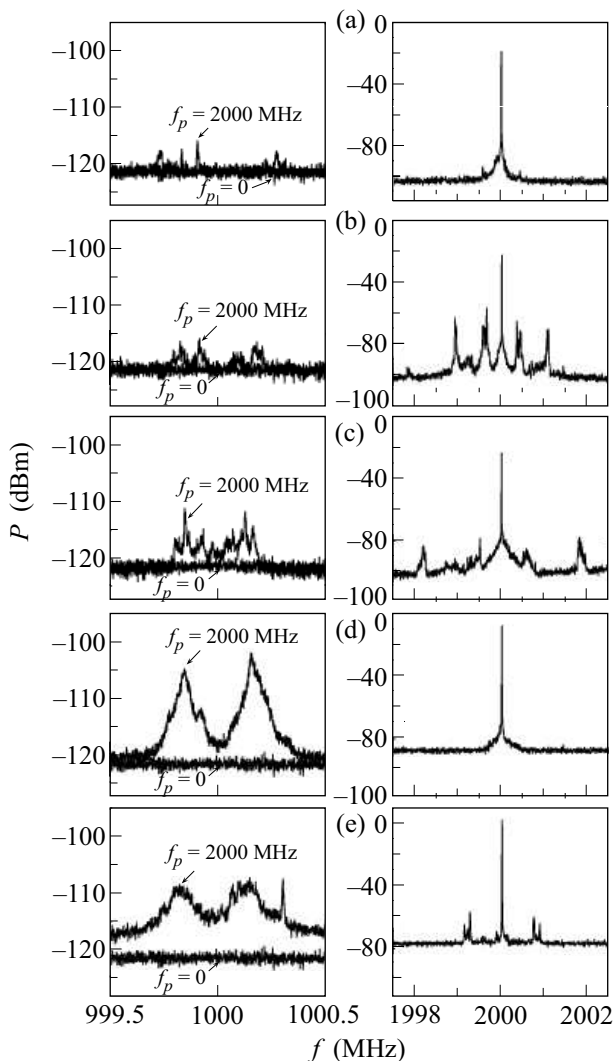


Рис.2. Спектры мощности спин-волнового излучения, измеренные на частотах  $\sim f_p/2$  (левая колонка) и сигнала накачки, измеренные на частотах  $\sim f_p$  (правая колонка) при различных уровнях  $P_{in}$ : 0 дБмВт (а), +10 дБмВт (б), +15 дБмВт (с), +22 дБмВт (д), +28.7 дБмВт (е). Ширина полосы обзора – 1 МГц (левая колонка) и 5 МГц (правая колонка), ширина полосы приемника – 1 кГц

линии передачи (область III), вблизи частоты  $f_p/2$  в полосе частот  $2|\Delta f| < 0.6$  МГц регистрируются отдельные спектральные составляющие спин-волнового излучения, уровни мощности которых являются нестабильными (рис.2а, левая колонка). При этом в спектре мощности основного сигнала в области частоты  $f_p$  происходит уменьшение или даже исчезновение спутников первого типа, а в полосе частот  $2|\Delta f_2| \sim 0.5$  МГц становится заметной шумовая модуляция сигнала накачки спиновыми волнами (рис.2а, правая колонка). Отметим, что в ин-

тервале значений  $P_{in}$  от 0 дБмВт до +10 дБмВт на фоне незначительного изменения спектрального состава (рис.2б, левая колонка) и уровня интегральной мощности (рис.1) спин-волнового излучения наблюдается появление в области частоты  $f_p$  спутников со сплошным спектром, максимальный уровень спектральной плотности мощности которых значительно превышает уровень собственных шумов аппаратуры и при  $P_{in} = +10$  дБмВт на 40 дБ меньше уровня мощности основного сигнала (рис.2б, правая колонка). При этом полоса частот, в которой наблюдается появление указанных спутников, составляет величину  $\Delta f_2 \sim \pm 1$  МГц, что дает основание идентифицировать их как спутники второго типа [6, 7].

Достаточно уверенная регистрация спин-волнового излучения на частотах  $\sim f_p/2$  начинается при  $P_{in} = +15$  дБмВт, что соответствует окончанию падающего участка на динамической характеристике линии передачи (рис.1). В этом случае излучаемый из пленки ЖИГ сигнал имеет сильно изрезанный шумоподобный спектр шириной  $2|\Delta f| \sim 0.5$  МГц, практически симметрично расположенный относительно частоты  $f_p/2$  (рис.2с, левая колонка). В области частоты  $f_p$  наблюдается увеличение значений частот спутников второго типа и значительное уменьшение их максимальных уровней спектральной плотности мощности. При этом наблюдается уширение шумового пьедестала спектральной линии основного сигнала (рис.2с, правая колонка).

При дальнейшем увеличении  $P_{in}$  (область IV на рис.1) наблюдается резкое возрастание уровня  $P_{int}$ , а на частотах вблизи частоты  $f_p/2$  формируются два ярко выраженных спин-волновых пакета с шумоподобным спектром шириной  $2|\Delta f| \sim 0.6$  МГц (рис.2д, левая колонка). При этом частоты, на которых наблюдаются максимальные уровни спектральной плотности мощности обоих пакетов, располагаются практически симметрично относительно частоты  $f_p/2$ , а расстояние между ними составляет величину порядка 300 кГц. В спектре основного сигнала вблизи частоты  $f_p$  не наблюдаются спутники второго типа, а регистрируется увеличение шумового пьедестала более чем на 10 дБ в полосе частот, превышающей 5 МГц. При этом регистрация спутников первого типа становится более стабильной, а их число возрастает.

При больших уровнях  $P_{in}$ , соответствующих области V на рис.1, вблизи частоты  $f_p/2$  наблюдается возрастание уровня шумов в полосе частот  $2|\Delta f| > 1$  МГц и уменьшение максимальных уровней спектральной плотности мощности обоих спин-волновых пакетов (рис.2е, левая колонка). При этом в спект-

ре сигнала вблизи частоты  $f_p$  вновь наблюдается появление спутников второго типа в полосе частот  $2|\Delta f_2| \sim 2$  МГц, а уровень шумов в полосе частот более 5 МГц увеличивается более чем на 20 дБ. Отметим, что в данной области значений  $P_{in}$  спутники первого типа не регистрируются.

Изменение характера спин-волнового излучения в области частоты  $f_p/2$  с ростом уровня  $P_{in}$ , на наш взгляд, обусловлено следующими механизмами. Так, в области III за счет 3М процессов распада ПМСВ (1) происходит интенсивное параметрическое возбуждение магнитодипольных ООМСВ, которые, в свою очередь, возбуждают вторичные СВ. Возникает КН второго порядка [15–19] которая приводит к спин-волновому излучению на частотах вблизи  $f_p/2$ . Для касательно намагниченных ферромагнитных пленок при продольной накачке СВЧ полем было установлено [17], что в области малых значений постоянных магнитных полей, когда частота излучения  $f < f_{\perp} = \sqrt{f_H(f_H + f_M)}$  ( $f_H = \gamma H_0$ ,  $f_M = \gamma 4\pi M_0$ ,  $\gamma$  – гиромагнитное отношение, равное 2.8 МГц/Э), излучение наблюдается при  $f \cong 2f_H$ , что соответствует КН спиновых волн, наблюдаемой в объемных образцах ферромагнетиков [20]. При этом излучение из пленки возникало на частотах, отстройка которых от значения  $f_p/2$  могла превышать 1 ГГц. В нашем случае (рис.2) излучение из пленки ЖИГ регистрируется вблизи частоты  $f_p/2$ , соответствующей примерно частоте  $2f_H$  ( $f_H = 554$  МГц).

Интересным, на наш взгляд, экспериментальным результатом является регистрация в области IV на фоне шумоподобного сигнала двух ярко выраженных спин-волновых пакетов, равноотстоящих от частоты  $f_p/2$  на величину порядка 300 кГц (рис.2d, левая колонка). Данный факт связан с тем, что с увеличением уровня  $P_{in}$  в пленке ЖИГ происходит снижение эффективности возбуждения ПМСВ микрополосковой линией за счет нелинейных потерь ПМСВ [22] (на рис.1 наблюдается насыщение уровня мощности ПМСВ накачки в области IV и его резкое уменьшение в области V). Возрастание уровня  $P_{out}$  с увеличением  $P_{in}$  в областях IV и V (рис.1) свидетельствует о наличии дополнительного канала передачи СВЧ мощности на выходной преобразователь. “Просачивание” СВЧ сигнала большой амплитуды на выходной преобразователь приводит к параметрическому возбуждению СВ неоднородным СВЧ магнитным полем большой амплитуды вблизи краев микрополосковой линии [11]. При этом наблюдается невырожденное возбуждение обменных СВ на частотах спин-волнового резонанса, близких к  $f_p/2$ , с большими значениями  $n$  ( $n$ -номер резонансной моды СВ) в толстых

пленках [4]. Последнее обстоятельство и обуславливает возбуждение двух спин-волновых пакетов, имеющих максимальный уровень спектральной плотности мощности на частотах, отстоящих от  $f_p/2$  на величину  $\Delta f \sim \pm 150$  кГц.

Кроме того, параметрически возбужденные СВ в области выходного преобразователя сами становятся источником ВСВ, что приводит к усилению КН и к расширению шумоподобного спектра вблизи частоты  $f_p/2$  с ростом уровня  $P_{in}$  (рис.2e, левая колонка). Появление отдельных спектральных составляющих вблизи частоты  $f_p$  в области V (рис.2e, правая колонка) может быть обусловлено четырехмагнитонными процессами распада ПМСВ ( $2f_p = f_1 + f_2$ ,  $2\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ ) [18], наличие которых совместно с КН второго порядка СВ приводит к резкому снижению интенсивности параметрического возбуждения магнитодипольных ООМСВ, что проявляется в отсутствии в спектре основного сигнала спутников первого типа.

Необходимо подчеркнуть, что отмеченный выше механизм КН в окрестности частоты  $f_p/2$  при боль-

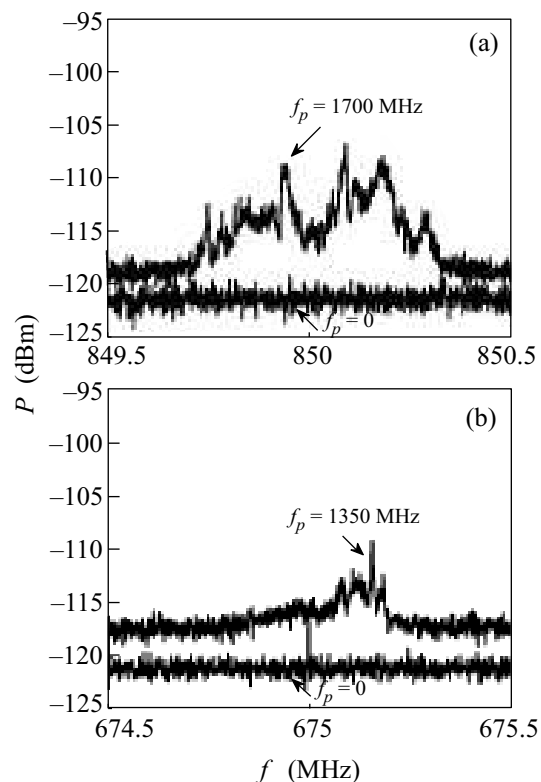


Рис.3. Спектры мощности спин-волнового излучения, измеренные на частотах  $\sim f_p/2$  при  $P_{in} = +22$  дБмВт и различных значениях частоты накачки  $f_p$ : 1700 МГц (а), 1350 МГц (б). Ширина полосы обзора – 1 МГц, ширина полосы приемника – 1 кГц

ших уровнях  $P_{in}$  проявляется и тогда, когда частота накачки находится ниже частоты  $f_{\perp} = 1707$  МГц – нижней частотной границы ПМСВ (рис.3). В этом случае в окрестности частоты  $f_p/2$  формируется шумоподобный спектр спин-волнового излучения (рис.3а), причем с уменьшением  $f_p$  КН наблюдается вплоть до частот  $f_p/2 \sim f_H$  (рис.3б). Однако при  $f_p < f_{\perp}$  в спектре сигнала вблизи частоты  $f_p/2$  отсутствуют ярко выраженные спин-волновые пакеты.

В заключение отметим, что описанные выше особенности спин-волнового излучения в направлении распространения волны (режим “на проход”) в условиях ЗМ процессов распада ПМСВ и возникновения кинетической неустойчивости СВ при различных уровнях мощности входного сигнала представляют особый интерес для понимания механизмов стохастизации сигнала в нелинейных линиях передачи на МСВ, а также в кольцевых автоколебательных системах на их основе, используемых для генерации как узкополосных, так и широкополосных хаотических сигналов [23–25].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 07-02-00639), гранта президента РФ (# МК-1320.2007.9) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект # НШ-355.2008.2).

1. А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков, *Магнитные колебания и волны*, М.: Наука, 1994.
2. Г. Т. Казаков, А. В. Кожевников, Ю. А. Филимонов, *ЖЭТФ* **115**, 318 (1999).
3. А. В. Вашковский, Э. Г. Локк, *Письма в ЖЭТФ* **60**, 545 (1994).
4. П. Е. Зильберман, Н. С. Голубев, А. Г. Темирязов, *ЖЭТФ* **97**, 634 (1990).

5. Б. Н. Гусев, А. Г. Гуревич, А. Н. Анисимов и др., *ФТТ* **28**, 2969 (1986).
6. А. М. Медников, *ФТТ* **23**, 242 (1981).
7. А. Г. Темирязов, *ФТТ* **29**, 313 (1987).
8. Г. А. Мелков, С. В. Шолом, *ЖЭТФ* **96**, 712 (1989).
9. Г. М. Дудко, Г. Т. Казаков, А. В. Кожевников, Ю. А. Филимонов, *Письма в ЖТФ* **13**, 736 (1987).
10. G. Srinivasan and C. E. Patton, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 447 (1985).
11. Г. А. Вугальтер, *ЖЭТФ* **97**, 1901 (1990).
12. Г. А. Мелков, *ФТТ* **30**, 2533 (1988).
13. А. Н. Анисимов, О. А. Чивилева, А. Г. Гуревич, *ФТТ* **32**, 1622 (1990).
14. В. Е. Демидов, Н. Г. Ковшиков, *ЖТФ* **69**, 100 (1999).
15. П. Е. Зильберман, С. А. Никитов, А. Г. Темирязов, *Письма в ЖЭТФ* **42**, 92 (1985).
16. Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, С. А. Никитов, А. Г. Темирязов, *ФТТ* **28**, 2774 (1986).
17. Г. А. Мелков, С. В. Шолом, *ЖЭТФ* **99**, 610 (1991).
18. Г. Т. Казаков, А. В. Кожевников, Ю. А. Филимонов, *ФТТ* **39**, 330 (1997).
19. Ю. В. Гуляев, А. Г. Темирязов, М. П. Тихомирова, П. Е. Зильберман, *РиЭ* **18**, 161 (2003).
20. А. В. Лавриненко, В. С. Львов, Г. А. Мелков, В. Б. Черепанов, *ЖЭТФ* **81**, 1022 (1981).
21. В. С. Лутовинов, Г. А. Мелков, А. Ю. Тараненко, В. Б. Черепанов, *ЖЭТФ* **95**, 760 (1989).
22. А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. П. Шаревский, *Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот*, Изд-во Саратовского государственного университета, Саратов, 1993.
23. В. Е. Демидов, Н. Г. Ковшиков, *Письма в ЖТФ* **24**, 66 (1998).
24. W. Mingzhong, V. A. Kalinikos, and C. E. Patton, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 237202 (2005).
25. С. В. Гришин, В. С. Гришин, А. Е. Храмов, Ю. П. Шаревский, *ЖТФ* **78**, 89 (2008).