

УДК 537.876

ЭФФЕКТ РАСЩЕПЛЕНИЯ ЧАСТОТ ВЫРОЖДЕННЫХ МОД ФЕРРИТОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

И. В. ЗАВИСЛЯК, Г. Л. ЧУМАК

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
Украина, Киев, 01601, ул. Владимирская, 64/13*

Аннотация. Рассмотрен эффект расщепления частот магнито-диэлектрических мод в дисковых ферритовых резонаторах в магнитном поле. Получена упрощенная формула для оценки величины расщепления. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов по эффекту расщепления частот магнито-диэлектрических мод в миллиметровом диапазоне. Предложено использование эффекта расщепления частот магнито-диэлектрических мод как альтернативы ферромагнитному резонансу в устройствах с магнитной перестройкой частоты, при величинах полей подмагничивания на порядок меньших, чем при использовании ферромагнитного резонанса. Исследованы особенности эффекта расщепления мод в разных классах ферритов и показано, что он имеет место как в СВЧ так и оптическом диапазонах. Оценочная величина расщепления частот мод в окне прозрачности ЖИГ может достигать 9 ГГц, что сопоставимо с величиной расщепления 5 ГГц в миллиметровом диапазоне. Обсуждены границы частотных диапазонов, в которых эффект расщепления частот имеет прикладной интерес. В частности, эффект в гексаферрите бария может быть использован как в зарезонансной так и дорезонансной областях, что практически нереально для феррогранатов и феррошпинелей.

Ключевые слова: расщепление мод; ЖИГ; гексаферрит бария; ферритовые дисковые резонаторы; взаимные устройства

ВВЕДЕНИЕ

Частотное вырождение собственных волн и колебаний является достаточно распространенным явлением. Так в электродинамических системах, имеющих аксиальную симметрию, азимутально-неоднородные моды, по крайней мере дважды вырождены [1], поскольку имеет место так называемое поляризационное вырождение. Под последним понимают тот факт, что моды, отличные по поляризации электромагнитных полей, имеют одну и ту же частоту.

Формальным признаком вырождения является квадратичная зависимость частот мод от азимутального индекса. Применительно к однородной изотропной безграничной среде ее возможно рассматривать как аксиально-сим-

метричную по отношению к направлению распространения электромагнитных волн. Поэтому собственные волны дважды вырождены и обе собственные волны имеют одинаковые дисперсионные характеристики независимо от поляризации полей, которая может быть как линейной, так и круговой [2].

В круглых полых металлических и открытых диэлектрических волноводах аксиально-неоднородные моды H_{mn} и E_{mn} , EH_{mn} и HE_{mn} , соответственно, по крайней мере дважды вырождены, т.к. $m \neq 0$ [2, 3]. Поскольку резонатор часто представляет собой отрезок волновода, то собственные моды аксиально-симметричных резонаторов, например, наиболее

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никольский, В. В.; Никольская, Т. И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Наука, 1989. 543 с.
2. Григорьев, А. Д. *Электродинамика и техника СВЧ*. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.
3. Лебедев, И. В. *Техника и приборы СВЧ*. М.: Высшая школа, 1970. 437 с.
4. Ильченко, М. И.; Взятыхшев, В. Ф.; Гассанов, Л. Г. [и др.]. *Диэлектрические резонаторы*. М.: Радио и связь, 1989. 327 с.
5. Безбородов, Ю. М.; Нарытник, Т. Н.; Федоров, В. Б. *Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах*. К.: Техника, 1989. 184 с.
6. Piyinski, A. S.; Slepyan, G. Ya.; Slepyan, A. Ya. *Propagation, Scattering and Dissipation of Electromagnetic Waves*. London: IET, 1993.
7. Гуревич, А. Г. *Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках*. М.: Наука, 1973. 591 с.
8. Bosma, H. On the principle of stripline circulation. *Proc. IEE - Part B: Electronic and Communication Engineering*, Vol. 109, No. 21, P.137-146, 1962. DOI: [10.1049/pi-b-2.1962.0027](https://doi.org/10.1049/pi-b-2.1962.0027).
9. Zhang, Zhizhi; Liu, Jiuling; Ding, Hao; Feng, Zekun; Nie, Yan. Microwave bandpass filters tuned by the magnetization of ferrite substrates. *IEEE Magnetic Lett.*, Vol. 8, 2016. DOI: [10.1109/LMAG.2016.2623717](https://doi.org/10.1109/LMAG.2016.2623717).

10. Arabi, Eyad; Ghaffar, Farhan A.; Shamim, Atif. Tunable bandpass filter based on partially magnetized ferrite LTCC with embedded windings for SoP applications. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 25, No.1, P.16-18, Jan 2015. DOI: [10.1109/LMWC.2014.2365748](https://doi.org/10.1109/LMWC.2014.2365748).
11. Chattopadhyay, Tarapasrad; Bhattacharyya, Prosenjit; Dawn, Santosh Kumar. Frequency tuning of an active microwave bandpass filter by a monotone microwave carrier. *Int. J. Electronics Lett.*, Vol. 5, No.2, P. 212-220, 2017. DOI: [10.1080/21681724.2016.1175673](https://doi.org/10.1080/21681724.2016.1175673).
12. Nikytenko, A. L.; Chevnyuk, L. V.; Grygoruk, V. I.; Kostenko, V. I.; Romaniuk, V. F. Tunable bandpass filter based on single-crystal platelet of BaFe₁₂O₁₉ in multidomain area. *Proc. of 9th Int. Kharkiv Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, 20-24 June 2016, Kharkiv, Ukraine*. IEEE, 2016. DOI: [10.1109/MSMW.2016.7538106](https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538106).
13. Cao, Weiping; Jiang, Di; Liu, Yupeng; Yang, Yuanwang; Gan, Baichuan. A microwave tunable bandpass filter for liquid crystal applications. *Frequenz*, Vol. 71, No. 7-8, June 2017. DOI: [10.1515/freq-2016-0068](https://doi.org/10.1515/freq-2016-0068).
14. Zhang, Yuanyuan; Feng, Xixi; Zhu, Kaiqiang; Yang, Xi; Li, Houmin. An X-band tunable circulator based on Yttrium iron garnet thin film. *Proc. of IEEE Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, 5-8 Jun 2016, Beijing, China*. IEEE, 2016. DOI: [10.1109/ICMMT.2016.7761796](https://doi.org/10.1109/ICMMT.2016.7761796).
15. Belyaev, B. A.; Lemberg, Konstantin V.; Serzhantov, Alexey M.; Leksikov, Aleksandr A.; Bal'va, Yaroslav F.; Leksikov, Andrey A. Magnetically tunable resonant phase shifters for UHF band. *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 51, No. 6, June 2015. DOI: [10.1109/TMAG.2014.2368513](https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2368513).
16. Ustinov, A. B.; Kalinikos, B. A.; Srinivasan, G. Nonlinear multiferroic phase shifters for microwave frequencies. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 104, No. 5, Feb 2014. DOI: [10.1063/1.4864315](https://doi.org/10.1063/1.4864315).
17. Park, Byeong-Yong; Kim, Tae-Wan; Arya, A. K.; Park, Seung-Young; Park, Seong-Ook. Theory and design of a cylindrical ferrite resonator antenna using HE_{1,18} mode splitting behavior. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 64, No. 12, P. 5547-5552, Dec 2016. DOI: [10.1109/TAP.2016.2623486](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2623486).
18. Bourhill, J.; Kostylev, N.; Goryachev, M.; Creedon, D. L.; Tobar, M. E. Ultrahigh cooperativity interactions between magnons and resonant photons in YIG sphere. *Phys. Rev. B*, Vol. 93, No. 14, P. 144420-1-144420-8, April 2016. DOI: [10.1103/PhysRevB.93.144420](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.144420).
19. Kim, Tae-Wan; Park, Byeong-Yong; Park, Seung-Young; Park, Seong-Ook. Calculation of magnetization value and permeability tensor of a partially magnetized cylindrical ferrite resonator. *IEEE Magnetics Lett.*, Vol. 7, Feb 2016. DOI: [10.1109/LMAG.2016.2532319](https://doi.org/10.1109/LMAG.2016.2532319).
20. Klopfer, Klaus; Ackermann, Wolfgang; Weiland, Thomas. Computation of complex eigenmodes for resonators filled with gyrotropic materials. *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 51, No. 1, Jan 2015. DOI: [10.1109/TMAG.2014.2338275](https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2338275).
21. Laur, Vincent; Verissimo, Gregory; Queffelec, Patrick; Farhat, eo Arij; Alaaeddine, Hussain; Reihls, Jean-Claude; Laroche, Eric; Martin, Gilles; Lebourgeois, Richard; Ganne, Jean-Pierre. Modeling and characterization of self-biased circulators in the mm-wave range. *Proc. of IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, 17-22 May 2015, Phoenix, AZ, USA. IEEE, 2015. DOI: [10.1109/MWSYM.2015.7166760](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2015.7166760).
22. Gurevich, A. G.; Melkov, G. A. *Magnetization Oscillations and Waves*. CRC Press, 1996.
23. Helszajn, J. *Passive and Active Microwave Circuits*. Wiley-Interscience Pub., 1978.
24. Каганов, М. И.; Пустыльник, Н. Б.; Шалаева, Т. И. Магноны, магнитные поляритоны, магнитостатические волны. *УФН*, Т. 167, № 2, С. 191-237, 1997. DOI: [10.3367/UFNr.0167.199702d.0191](https://doi.org/10.3367/UFNr.0167.199702d.0191).
25. How, H.; Vittoria, C. Microwave phase shifter utilizing nonreciprocal wave propagation. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 52, No. 8, P. 1813-1819, 2004. DOI: [10.1109/TMTT.2004.828466](https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.828466).
26. Green, J. J.; Sandy, F. Microwave characterization of partially magnetized ferrites. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 22, No. 6, P. 641-645, Jun 1974. DOI: [10.1109/TMTT.1974.1128306](https://doi.org/10.1109/TMTT.1974.1128306).
27. Данилов, В. В.; Зависляк, И. В.; Балинский, М. Г. *Спин-волновая электродинамика*. К.: Либідь, 1991.
28. Яковлев, Ю. М.; Генделев, С. Ш. *Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике*. М.: Советское радио, 1975. 360 с.
29. Будаков, Б. М.; Фомин, С. В. *Кратные интегралы и ряды*. М.: Наука, 1965. 607 с.
30. Popov, M. A.; Zavislyak, I. V.; Srinivasan, G. Sub-THz dielectric resonance in single crystal yttrium iron garnet and magnetic field tuning of the modes. *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, No. 2, P. 24112, Jun 2011. DOI: [10.1063/1.3607873](https://doi.org/10.1063/1.3607873).
31. Мовчан, Н. Н.; Зависляк, И. В.; Попов, М. А. Расщепление аксиально неоднородных мод в гироманитных и гироэлектрических резонаторах миллиметрового диапазона. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 55, № 12, С. 31-40, 2012. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347012120047>.
32. Young, D.; Tsai, C. S. GHz bandwidth magneto-optic interaction in yttrium iron garnet-gadolinium gallium garnet waveguide using magnetostatic forward volume waves. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 53, No. 18, P. 1696-1698, 1988. DOI: [10.1063/1.99800](https://doi.org/10.1063/1.99800).
33. le Gall, H.; Jamet, J. P. Theory of elastic and inelastic scattering of light by magnetic crystals. I. First-Order Processes. *Phys. Stat. Sol. (B)*, Vol. 46, No. 2, P. 467-482, 1971. DOI: [10.1002/pssb.2220460202](https://doi.org/10.1002/pssb.2220460202).
34. Dionne, G. F.; Allen, G. A.; Haddad, P. R.; Ross, C. A.; Lax, B. Circular polarization and nonreciprocal propagation in magnetic media. *Lincoln Laboratory J.*,

Vol. 15, No. 2, P. 323-340, 2005. URI: https://il.mit.edu/publications/journal/pdf/vol15_no2/15_2-10.pdf.

35. Krinchik, G. S.; Chetkin, M. V. Transparent ferromagnets. *Sov. Phys. Usp.*, Vol. 12, No. 3, P. 307-319, 1969. DOI: [10.1070/PU1969v012n03ABEH003902](https://doi.org/10.1070/PU1969v012n03ABEH003902).

36. Plant, J. S. 'Pseudo-acoustic' magnon dispersion in yttrium iron garnet. *J. Phys. C: Solid State Phys.*, Vol. 16, No. 36, P. 7037-7051, 1983. DOI: [10.1088/0022-3719/16/36/019](https://doi.org/10.1088/0022-3719/16/36/019).

37. Marshall, S. P.; Sokoloff, J. B. Spin-wave spectrum for barium ferrite. *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, No. 4, P. 2017-2023, 1990. DOI: [10.1063/1.345583](https://doi.org/10.1063/1.345583).

38. Marshall, S. P.; Sokoloff, J. B. Phonon spectrum for barium ferrite. *Phys. Rev. B*, Vol. 44, No. 2, P. 619-627, 1991. DOI: [10.1103/PhysRevB.44.619](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.619).

39. Popov, M. A.; Zavislyak, I. V.; Tatarenko, A. S.; Srinivasan, G.; Balbashov, A. M. Magnetic and dielectric

excitations in the W-band in aluminum substituted barium and strontium hexaferrites. *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 45, No. 5, P. 2053-2058, May 2009. DOI: [10.1109/TMAG.2008.2008414](https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008414).

40. Popov, M.; Zavislyak, I.; Ustinov, A.; Srinivasan, G. Sub-terahertz magnetic and dielectric excitations in hexagonal ferrites. *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 47, No. 2, P. 289-294, Feb 2011. DOI: [10.1109/TMAG.2010.2091677](https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2091677).

41. Popov, M. A.; Zavislyak, I. V.; Movchan, N. N.; Gudim, I. A.; Srinivasan, G. Mode splitting in 37-42 GHz barium hexaferrite resonator: Theory and device applications. *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 50, No. 6, June 2014. DOI: [10.1109/TMAG.2014.2298498](https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2298498).

Поступила в редакцию 23.06.2017

После переработки 29.09.2017