

Моделирование передаточных характеристик фазовращателя на слоистой структуре феррит-диоксид ванадия

А.А. Никитин, В.В. Витько, А.А. Никитин, А.Б. Устинов, В.В. Карзин, А.Е. Комлев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Проведено моделирование дисперсионных и передаточных характеристик слоистых структур феррит-диэлектрик-диоксид ванадия. Предложена конструкция фазовращателя на структуре длиной 1 мм, обеспечивающая на частоте 8,99 ГГц набег фазы 5,3 рад при уровне вносимых потерь 2,1 дБ.

Ключевые слова: пленки диоксида ванадия, спиновые волны, пленки ферритов, фазовый переход металл-диэлектрик, управляемые СВЧ-приборы

1. Введение

Современное развитие микро- и нанотехнологий открывает новые возможности для создания композитных структур, значительно расширяющих функциональность исходных материалов. Например, комбинация ферритов с различными материалами такими, как сегнетоэлектрики или пьезоэлектрики позволяет создавать перспективные управляемые СВЧ-устройства [1-5]. Другим электродинамическим подходом к управлению спектром спиновых волн является использование структур феррит-металл [6, 7]. Общая идея этого эффекта заключается в появлении дополнительного фазового набег спиновых волн в ферритовой пленке вследствие изменения расстояния между ферритом и идеально-проводящим металлическим экраном. К недостаткам данного способа изменения дисперсионных свойств спиновых волн следует отнести малую скорость и необходимость сверхточного позиционирования экрана. Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование материалов с фазовым переходом металл-диэлектрик. В настоящее время большинство работ посвящено исследованию диоксида ванадия, который с прикладной точки зрения является наиболее перспективным материалом [8]. Основное практическое преимущество этого материала проявляется в значительном изменении проводимости на 4-5 порядков вблизи температуры фазового перехода около 340 К, а также в высокой скорости переключения (порядка сотен пикосекунд) [9]. Отметим, что исследования влияния проводимости на СВЧ свойства многослойных структур на основе магнитных материалов в настоящее время являются весьма актуальным [10-12]. Так, в работе [13] была впервые предложена конструкция миниатюрного спин-волнового фазовращателя на слоистой структуре феррит-диоксид. Целью данной работы является исследование СВЧ свойств слоистых структур феррит-диоксид ванадия для их применения в управляемых устройствах СВЧ-диапазона.

2. Теоретическая модель спектра спиновых волн в многослойных структурах феррит-диэлектрик-металл

Исследуемая структура намагничена до насыщения однородным магнитным полем H_0 . Ферритовые слои имеют толщины t_{2i} , диэлектрические проницаемости ε_{2i} и намагниченности насыщения M_{2i} , где i - любое целое от 1 до N . Магнитные свойства ферритовых слоев описываются комплексным тензором магнитной проницаемости:

$$\hat{\mu}_{2i} = \begin{pmatrix} \mu_{d2i} & j\mu_{a2i} & 0 \\ -j\mu_{a2i} & \mu_{d2i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\mu_{d2i} = 1 + \frac{(\omega_h + j\alpha_{2i}\omega)\omega_{m2i}}{(\omega_h + j\alpha_{2i}\omega)^2 - \omega^2}$, $\alpha_{2i} = \frac{\gamma\Delta H_{2i}}{\omega_h}$, $\omega_{m2i} = \gamma M_{2i}$, $\omega_h = \gamma H_0$,
 $\mu_{a2i} = \frac{\omega\omega_{m2i}}{(\omega_h + j\alpha_{2i}\omega)^2 - \omega^2}$, $\gamma = 2.8$ МГц/Э и ΔH_{2i} – полуширина кривой

ферромагнитного резонанса, а ω – угловая частота. Каждый ферритовый слой окружен диэлектрическим или металлическим слоем толщиной t_{2i+1} . Таким образом, четный номер соответствует ферриту, а нечетный – диэлектрику или металлу. Любой нечетный слой может быть диэлектрическим или проводящим, имеющим комплексную диэлектрическую проницаемость:

$$\epsilon_{2i+1} = \epsilon_{2i+1} - j \frac{\sigma_{2i+1}}{\omega}, \quad (2)$$

где ϵ_{2i+1} и σ_{2i+1} – диэлектрическая проницаемость и проводимость нечетного слоя соответственно. Дисперсионное уравнение электромагнитно-спиновых волн в исследуемых структурах было найдено с помощью метода переходных матриц, который был подробно описан ранее [14]. В результате применения этого метода было получено комплексное дисперсионное уравнение, $\omega(\mathbf{k})$ где $\mathbf{k} = k' + jk''$ – комплексная постоянная распространения, а k' – фазовая постоянная и k'' – декремент затухания.

3. Исследование дисперсионных характеристик слоистых структур феррит-диоксид ванадия

На рисунке 1(а) представлена исследуемая структура на основе пленок феррита и диоксида ванадия. В расчетах были использованы стандартные параметры, соответствующие эпитаксиальной пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ) ($t_2 = 10$ мкм, $\epsilon_2 = 14$, $M_2 = 1750$ Гс, $\Delta H = 0.5$ Э) на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) ($t_1 = 500$ мкм, $\epsilon_1 = 14$) и поликристаллической пленки диоксида ванадия ($t_5 = 0.5$ мкм) на сапфировой подложке ($t_7 = 500$ мкм, $\epsilon_7 = 10$). Все остальные слои, включая промежуточный диэлектрический слой, имеют нулевую толщину, т.е. $t_3 = t_4 = t_6 = 0$. На рисунке 1(б) показана типичная температурная зависимость проводимости VO_2 (σ_5). Как видно из данного рисунка малое увеличение температуры пленки VO_2 вблизи фазового перехода приводит к резкому изменению ее проводимости. Значками разных цветов показаны проводимости, значения которых использованы для расчета дисперсионных характеристик спиновых волн в исследуемой структуре. Цвет линии соответствует цвету значка. Черная штриховая линия, рассчитанная при $\sigma_5 \rightarrow \infty$, представляет собой вспомогательную зависимость, соответствующую дисперсии Сешадри. Из рисунка 1(в) видно, что при малом значении проводимости пленки диоксида ванадия ее влияние на дисперсию спиновых волн пренебрежимо мало. Увеличение σ_5 обеспечивает изменение дисперсии. Схожее поведение дисперсионной характеристики наблюдается при уменьшении расстояния между пленкой ЖИГ и идеально проводящим металлом, описываемое дисперсионным соотношением Бонджианни [7]. Такая перестройка дисперсионной характеристики приводит к изменению волнового числа, что показано на рисунке 1(г). Разность

волновых чисел, соответствующих дисперсии Дэймона-Эшбаха и Сешадри, показана на рисунке 1(г) черной пунктирной линией и соответствует максимальному достижимому влиянию идеального слоя металла ($\sigma_5 \rightarrow \infty$). Как видно из рисунка увеличение σ_5 расширяет диапазон частот, в котором наблюдается изменение волнового числа и обеспечивает более высокие значения такого изменения.

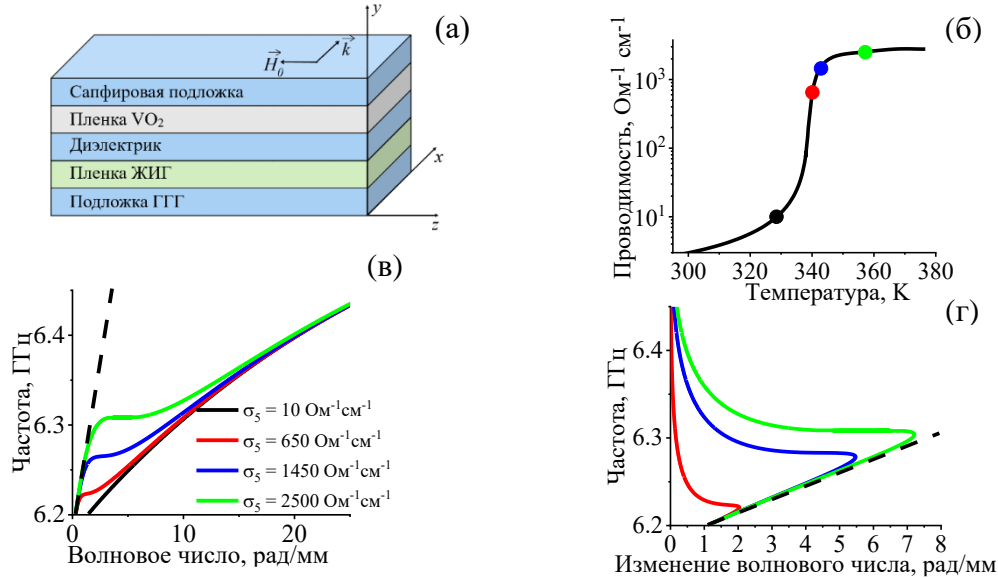


Рисунок 1. Многослойная структура ЖИГ-VO₂ (а); зависимость проводимости VO₂ от температуры (б); дисперсионные характеристики спиновых волн при различных значениях проводимости VO₂ (в); перестройка волнового числа (г).

4. Исследование дисперсионных и передаточных характеристик слоистых структур феррит-диоксид ванадия

Рассмотрим рассчитанные по разработанной теоретической модели передаточные характеристики СВЧ фазовращателя на основе тонкопленочной структуры ЖИГ-VO₂. Волновод на пленке ЖИГ ($\Delta N = 0.5$ Э и $t_2 = 20$ мкм) расположен над антеннами в контакте со слоистой структурой SiO₂/VO₂/Al₂O₃, как показано на рисунке 2(а). Толщины слоев диоксида кремния и диоксида ванадия составляют $t_3 = 200$ мкм и $t_5 = 0.5$ мкм соответственно. Длина слоистой структуры ГГГ/ЖИГ/SiO₂/VO₂/Al₂O₃ равна $l = 1$ мм. В расчетах предполагается, что температура структуры в начальный момент составляет $T = 333$ К. Намагниченность насыщения пленки ЖИГ в соответствии с рисунком 2(б) составляет $M_2 = 1570$ Гс. Для нагрева пленки VO₂ предлагается использовать лазерный импульс как показано на рисунке 2(а), который обеспечивает увеличение температуры VO₂ от 333 К до 345 К, что в соответствии с рисунком 1(б) приводит к изменению проводимости от $\sigma_5 = 20$ Ом⁻¹см⁻¹ до $\sigma_5 = 2350$ Ом⁻¹см⁻¹. Это в свою очередь обеспечивает изменение дисперсии и появление дополнительного фазового набег, показанного на рисунке 2(в) черной сплошной линией. Передаточные характеристики исследуемого фазовращателя, полученные с использованием следующего выражения

$$S_{21} = 20 \cdot \lg(\exp(-k'l)), \quad (3)$$

представлены на рисунке 2(в) синей и красной линиями для случаев $\sigma_5 = 20$ Ом⁻¹см⁻¹ и $\sigma_5 = 2350$ Ом⁻¹см⁻¹ соответственно. На частоте $f_0 = 8,99$ ГГц предлагаемая конструкция обеспечивает вносимые потери 2.1 дБ и фазовый набег 5.3 рад.

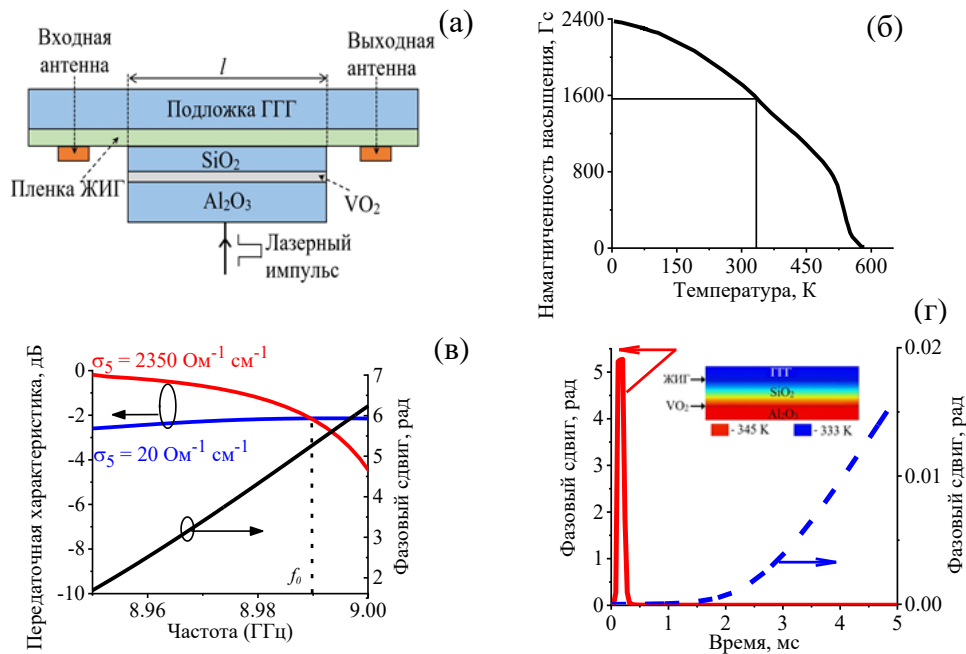


Рисунок 2. Фазовращатель на структуре ЖИГ-VO₂ (а); зависимость намагниченности ЖИГ от температуры (б) [23]; передаточная характеристика и фазовый сдвиг фазовращателя (в); зависимость фазового сдвига, обусловленного изменением проводимости (красная сплошная линия) и намагниченности (синяя пунктирная линия) (г) от времени. Вставка к рисунку показывает распределение температуры в момент времени 0.2 мс

Для описания распределения температуры по объему фазовращателя в результате воздействия лазерного импульса был использован программный пакет COMSOL Multiphysics®. При моделировании были выбраны следующие параметры лазерного излучения: длина волны $\lambda = 400$ нм, интенсивность $I = 11$ Вт/мм² и длительность импульса $\tau = 0,2$ мс. За время действия импульса температура диоксида ванадия увеличивается и достигает максимума ($T_{max} = 345$ К). Распределение температуры по объему исследуемой структуры в этот момент времени показано на вставке к рисунку 2(г). Лазерный импульс обеспечивает появление фазового сдвига (красная сплошная линия на рисунке 2 (г)), который на частоте f_0 достигает величины 5,3 рад. После окончания лазерного импульса температура пленки VO₂ и вызванный изменением проводимости фазовый набег уменьшаются. Промежуточный диэлектрический слой SiO₂ (см. рисунок 2(а)) обеспечивает тепловую изоляцию пленки ЖИГ, которая нагревается до температуры 333,35 К за 80 мс. Нагрев пленки ЖИГ в соответствии с рисунком 2(б) приводит к незначительному уменьшению намагниченности и появлению дополнительного фазового набега (синяя штриховая линия на рисунке 2 (г)), который не превышает 0,1 рад.

5. Заключение

Разработана теоретическая модель спектра рабочих электромагнитно-спиновых волн в слоистых структурах, содержащих пленки феррита и оксида ванадия. На примере фазовращателя проведено численное моделирование рабочих характеристик СВЧ-устройств на их основе. Изменение проводимости пленки диоксида ванадия приводит к перестройке спектра спиновых волн, что обеспечивает контролируемый набег фазы. Предложена конструкция СВЧ-фазовращателя на структуре длиной 1 мм, переключаемая лазерным импульсом длительностью 0,2 мс и обеспечивающая на частоте 8,99 ГГц набег фазы 5,3 рад при уровне вносимых потерь 2,1 дБ. Показано, что

для уменьшения паразитного набега фазы, обусловленного нагревом пленки ЖИГ, можно использовать тонкий диэлектрический слой, расположенный между пленками феррита и диоксида ванадия.

Список литературы

1. Vopson, M. M. Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications / M. M. Vopson // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2015. – V. 40. – № 4. – P. 1–28.
2. Fetisov, Y. K. Electrically tunable ferrite-ferroelectric microwave delay lines / Y. K. Fetisov, G. Srinivasan // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 87. – № 10. – P. 103502.
3. Ustinov, A. B. Electric field tunable ferrite-ferroelectric hybrid wave microwave resonators: Experiment and theory / A. B. Ustinov, [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2006. – V. 100. – № 9. – P. 093905.
4. Semenov, A. A. Ferrite-ferroelectric layered structures for electrically and magnetically tunable microwave resonators / A. A. Semenov [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – vol. 88. – p. 033503.
5. Fetisov, Y. K. Electric field tuning characteristics of a ferrite-piezoelectric microwave resonator / Y. K. Fetisov, G. Srinivasan // *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 88. – P. 143503.
6. Seshadri, S. R. Surface magnetostatic modes of a ferrite slab / S. R. Seshadri // *Proceedings of the IEEE*. – 1970. – V. 58. – № 3. – P. 506-507.
7. Bongiani, W. L. Magnetostatic propagation in a dielectric layered structure / W. L. Bongiani // *Journal of Applied Physics*. – 1972. – Vol. 43. – № 6. – P. 2541-2548.
8. Pergament, A.L. Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A review / Oxide electronics and vanadium dioxide perspective: A review // *Journal on selected topics in nano electronics and computing*. – 2013. – V. 1. – P. 24-43.
9. Yang, Z. Oxide electronics utilizing ultrafast metal-insulator transitions / Z. Yang, C. Ko, S. Ramanathan // *Annual Review of Materials Research*. – 2011. – V. 41. – P. 337-367.
10. Kostylev, M. P. Waveguide-based ferromagnetic resonance measurements of metallic ferromagnetic films in transmission and reflection / M. P. Kostylev // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 113. – P. 053908.
11. Mruczkiewicz, M. Nonreciprocal dispersion of spin waves in ferromagnetic thin films covered with a finite-conductivity metal / M. Mruczkiewicz and M. Krawczyk // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – V. 115. – № 11. – P. 113909.
12. Trossman, J. Phase detection of spin waves in yttrium iron garnet and metal induced nonreciprocity / A. J. Trossman, [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – V. 125. – № 5. – P. 053905.
13. Nikitin, A. A. Spin-Wave Phase Shifters Utilizing Metal-Insulator Transition / A. A. Nikitin, [et al.] // *IEEE Magnetics Letters*. – 2018. – V. 9. – P. 1-5.
14. Nikitin, A. A. Spin-electromagnetic waves in planar multiferroic multilayers / A. A. Nikitin [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2017. – vol. 122. – p. 014102.