

## Применение тонких пленок железоиттриевого граната в приборах СВЧ на магнитостатических волнах

А.Ю. Скворцова

АО «НПП «ФАЗА», г. Ростов-на-Дону

**Аннотация:** Статья посвящена исследованию и применению тонких пленок железоиттриевого граната (ЖИГ) в приборах СВЧ (перестраиваемых генераторах и фильтрах) на магнитостатических волнах. Рассматриваются свойства пленок, их физические принципы распространения, преимущества перед ЖИГ-сферами, проблема возникающего температурного дрейфа частоты (ТДЧ) и ее решения. Приведена концепция распространения спиновых волн. Описываются принципы работы приборов на магнитостатических волнах, их перспективы и конкурентные преимущества. Выполнено математическое моделирование кубической и одноосной анизотропии пленки ЖИГ для уменьшения ТДЧ и проведены подтверждающие испытания.

**Ключевые слова:** железоиттриевый гранат, генераторы, фазовращатели, линия задержки, перестраиваемые фильтры, анизотропия, спиновые волны, жидкофазная эпитаксия.

### Введение

Феррит-гранаты характеризуются кристаллическим строением, допускающим обширное замещение катионов без разрушения структуры, что обуславливает возможность получения материалов с варьируемыми характеристиками. Их свойства, выраженные в повышенной магнитной проницаемости и добротности, определили применение таких материалов в СВЧ устройствах.

Если сравнивать объемный монокристалл и тонкую пленку железоиттриевого граната (ЖИГ) можно выделить преимущества эпитаксиальных пленок, а именно - меньший расход шихты, простоту обработки, меньшие магнитные поля для возбуждения магнитостатических волн (МСВ).

Используя феррит-гранатовые пленки, в частности железоиттриевый гранат, разрабатываются перестраиваемые генераторы, обладающие отличительными особенностями, такими, как широкий диапазон перестройки частоты и незначительный фазовый шум.

Подобные устройства находят применение в телекоммуникационных системах для создания устойчивых каналов передачи данных с высокой концентрацией используемых частот, а также в радиолокационных системах.

В каждой современной радиолокационной системе ключевую роль играет фазовращатель (ФВ). В микроволновой технике сегодня широко распространены фазовращатели, использующие ферриты. Возможность плавной перестройки фазы сигнала возможна только при использовании в конструкции ФВ ферритов ЖИГ [1]. Главное преимущество ферритовых ФВ – их устойчивость к высоким уровням мощности радиосигналов.

На основе эпитаксиальной структуры ЖИГ может быть реализована конструкция сверхминиатюрной управляемой линии задержки на обменных спиновых волнах. Линии задержки может применяться в системах формирования и обработки радиосигналов СВЧ [2], также может применяться в качестве управляемого фазовращателя в фазированных антенных решетках.

В роли частотно-задающих устройств часто выступают перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры, использующие ферритовые материалы, а именно - монокристаллический железоиттриевый гранат. Такие устройства работают в широком диапазоне частот с заданной рабочей полосой. Существует ряд методов их термостабилизации (уменьшение температурного дрейфа частоты).

### **Эпитаксиальный синтез пленок ферритов гранатов**

Выращенные методом жидкофазной эпитаксии пленки феррит-гранатов нередко демонстрируют многослойное строение [3], которое сказывается на их функциональности в различных приборах.

Технология жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) предполагает формирование кристалла посредством осаждения из пересыщенного раствора на монокристаллической подложке. Такая подложка может быть

---

изготовлена из галлий-гадолиниевого граната с определенной ориентацией. Она погружается в тигель с расплавленной шихтой, материал осаждается на подложке, повторяя ее структуру.

Кратко опишем технологический процесс осаждения:

1. Помол шихты
2. Закладка в тигель и ее плавление
3. Добавление растворителя
4. Эпитаксия
5. Очистка

Время выращивания непосредственно определяет толщину эпитаксиального слоя феррит-граната. Использование жидкофазной эпитаксии позволяет создавать монокристаллические феррит-гранатовые слои с диапазоном толщин от одного микрометра до нескольких десятков микрометров. Различия в химическом составе и процессе синтеза феррит-гранатовых слоев сказываются на их магнитных свойствах и на том, как эти свойства изменяются в зависимости от толщины слоя.

### **Распространение спиновой волны**

Спиновые волны возникают, как результат скоординированного возбуждения магнитных моментов в материале [4]. Под влиянием внешнего магнитного поля, спиновая волна, перемещаясь сквозь структуру ЖИГ, представляет собой организованный набор спинов, совершающих прецессию вокруг оси намагничивания. При этом каждый спин в этой совокупности демонстрирует сдвиг фазы прецессии относительно соседних спинов, как показано на рисунке 1.

Тонкопленочные ферритовые материалы являются строительными блоками устройств на основе спиновых волн. Характеристики распространения спиновых волн в таких тонких пленках детально изучены и позволяют создавать разнообразные устройства.

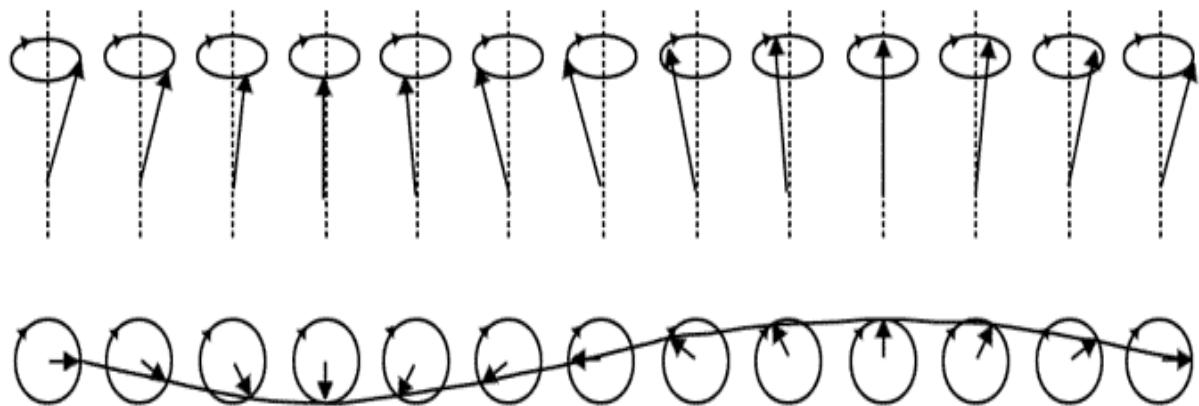


Рис.1. Схематическое представление спиновой волны

Широко распространенный подход к пониманию как генерации и распространения спиновых волн, так и передачи сигналов, заключается в применении простой конфигурации с двумя антennами [5], а именно - микрополосковой линии, представленной на рисунке 2.

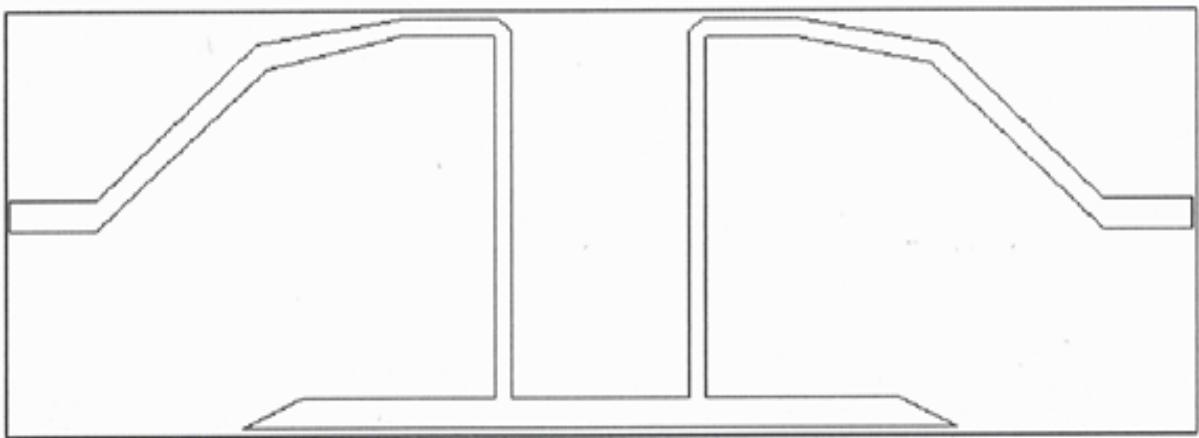


Рис.2. Микрополосковая линия

### Применение тонких пленок ЖИГ

1. СВЧ-генератор на планарном элементе из феррита-граната с применением ПМСВ

Генераторы, основанные на ЖИГ, обладающие возможностью перестройки частоты, известны благодаря широкому диапазону настройки и небольшому фазовому шуму. Такие устройства применяются в качестве частотно задающих элементов в СВЧ-трактах, где требуется высокая

частотная избирательность [6]. Применяемые для этого ЖИГ-сферы обладают некоторыми сложностями при их использовании: сложность изготовления идеальной сферы, высокая стоимость их получения, обязательный нагревательный элемент для поддержания постоянной рабочей температуры сферы ЖИГ, сложности монтажа.

В отличие от сфер, планарные элементы ЖИГ не имеют таких проблем, имеют меньшие размеры и легко встраиваются в интегральные схемы [7].

Данный метод дает возможность выпускать сразу множество компонентов за один процесс, занимающий менее часа. В то же время, выращивание сферических структур методом самопроизвольной кристаллизации требует минимум двое суток, а зонная плавка не гарантирует прецизионного управления составом, что, в свою очередь, приводит к нестабильности характеристик конечного продукта.

Внедрение плоских компонентов способно значительно повысить продуктивность изготовления и облегчить процедуры встраивания в актуальные комплексы.

Использование плоской компоновки позволяет значительно, вплоть до десятикратного, снизить величину поля намагничивания. Это, в свою очередь, делает магнитную систему более простой в реализации и благоприятно сказывается на её скорости работы.

Предложенный метод дает возможность сохранить сильные стороны обычных генераторов, использующих на сferах ЖИГ, но при этом существенно минимизировать их слабые места. Последующая доработка конструкции основных компонентов аппарата даст возможность улучшить параметры генератора и создать на его основе промышленный образец.

## 2. Полосно-пропускающие фильтры (ППФ)

ППФ состоит из: ферромагнитной пленки 1 расположенной на диэлектрической подложке 2, входной преобразователь (антенна) 3 преобразует энергию электромагнитной волны к в энергию спиновой волны.

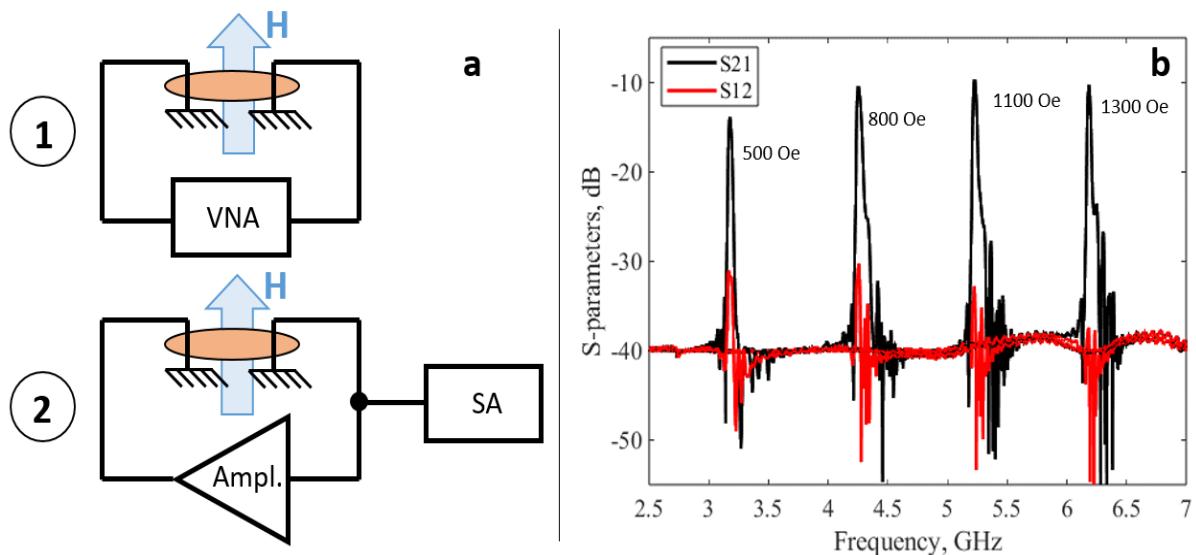


Рис 3. (а) Использование тонкопленочного ЖИГ.  
(б) S-параметры расчетного элемента по схеме (а) с различными магнитными полями.

Спиновая волна распространяется по пленке ЖИГ и достигает выходной антенны 4 где происходит обратное преобразование спиновой волны в электромагнитную. Подложка с ЖИГ расположена в зазоре между двух полюсных наконечников и магнитов, обеспечивающих создание поля подмагничивания необходимой величины и направления (рисунок 4).

Корпус прибора выполняет функцию замкнутой магнитной системы, которая создает необходимое магнитное поле  $H$  промагничивающее равномерно ЖИГ под 90 градусов от нормали. При необходимости магнитное поле создается электромагнитами с возможностью их управления. Для неперестраиваемых фильтров можно обойтись тщательно подобранными постоянными магнитами и магнитной системой.

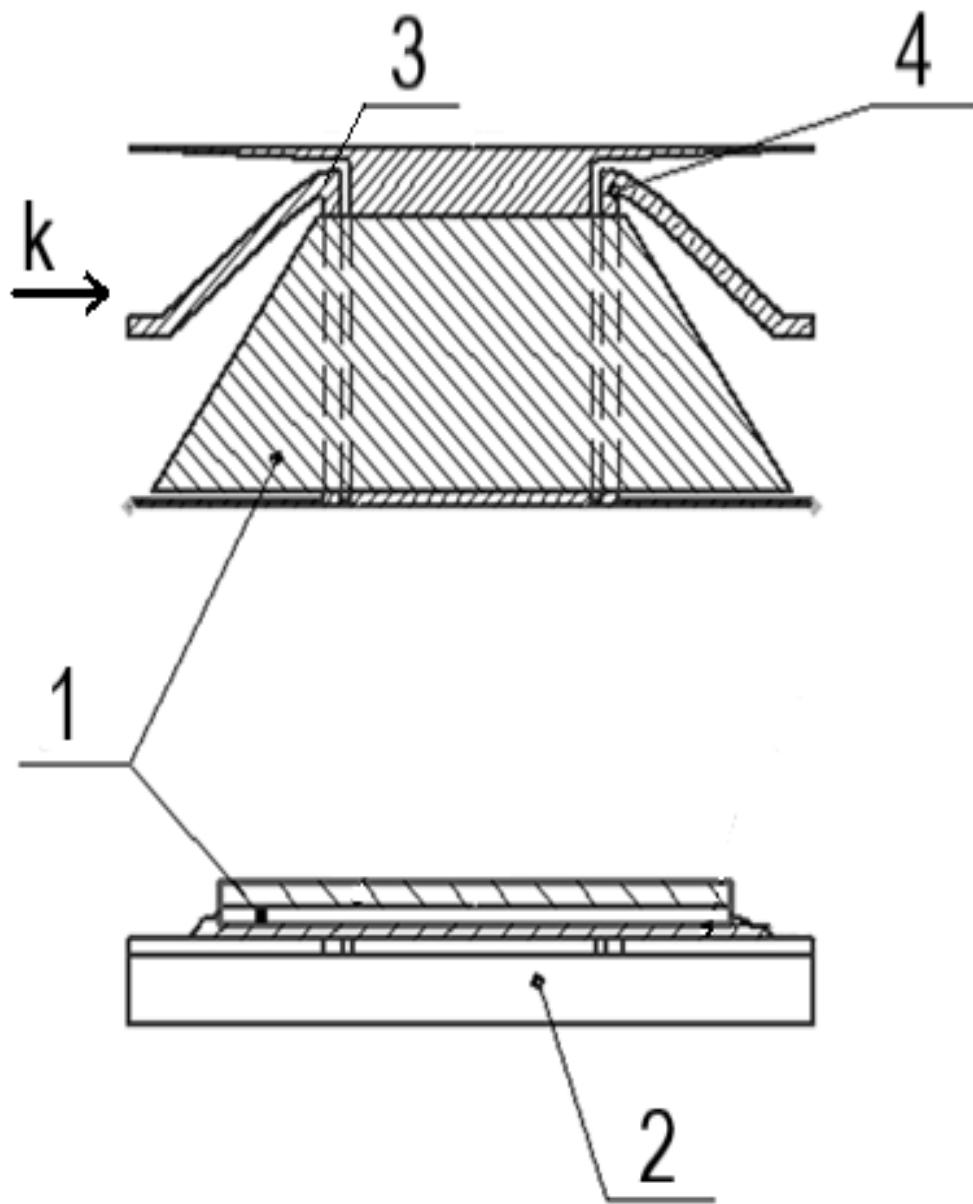


Рис.4. Конструкция спин-волнового прибора

В приборах, использующих тонкие пленки, существует проблема температурного дрейфа частоты (ТДЧ), которую мы решили расчетным методом и в дальнейшем подтвердили правильность расчетов испытаниями на АО «НПП «ФАЗА».

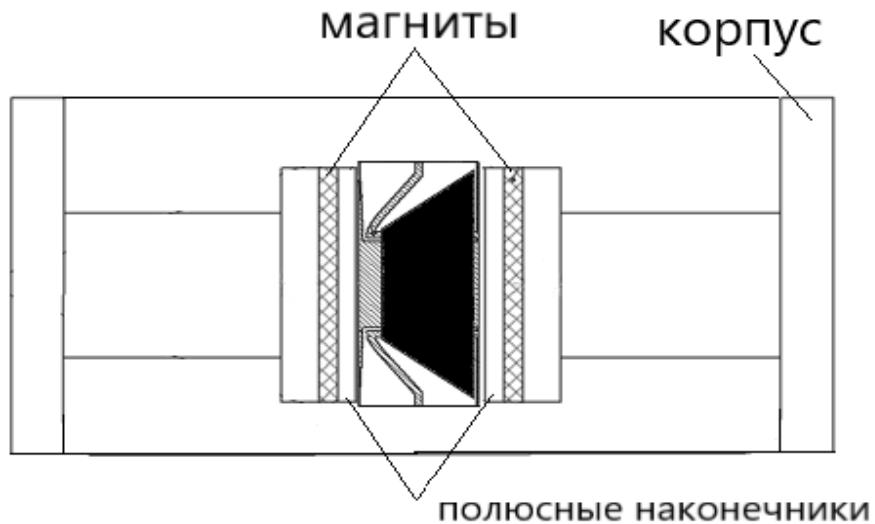


Рис.5. Магнитная система, вид сверху

Математическое моделирование, проведенное методом изменения состава и анизотропии ЖИГ для стабилизации температурных уходов в ППФ фильтрах, использующих ПМСВ.

В эпитаксиальной пленке ЖИГ можно рассчитать выражение энергии, так как частота однородной моды пропорциональна частоте ФМР.

$$U = -M_s H (\cos \theta \cos \theta_H \cos(\varphi - \varphi_H) - \sin \theta_H \sin \theta) + (2\pi M_s^2 + K_u) \sin^2 \theta - K_1 \left( \cos^3 \theta \sin \theta - \frac{4}{3} \sin^3 \theta \cos \theta + \sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \theta \cos 3\varphi - \frac{\sqrt{2}}{3} \cos^4 \theta \cos 3\varphi \right). \quad (1)$$

Здесь  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $H$  – величина постоянного магнитного поля,  $\theta_H$  – угол выхода поля из плоскости пленки,  $\varphi_H$  – угол между кристаллографическим направлением  $[2\bar{1}\bar{1}]$  и проекцией поля на плоскость пленки,  $\theta$  и  $\varphi$  – соответствующие углы для намагниченности,  $K_u$  – константа одноосной анизотропии,  $K_1$  – первая константа кубической анизотропии. Равновесное направление намагниченности определяется углами  $\theta_0$  и  $\varphi_0$ , при которых энергия (1) минимальна.

Значение частоты ферромагнитного резонанса (ФМР) определяется посредством вычисления вторых производных энергии по угловым координатам  $\theta = \theta_0$  и  $\varphi = \varphi_0$ .

Используя данные, известные для массивных образцов ЖИГ [8], для температурных зависимостей намагниченности насыщения  $M_s$  и константы кубической анизотропии  $K_1$  в интервале температур  $210 K < T < 350 K$ , получаем приближенные выражения:

$$M_s(T) \approx 139.2 - 0.295(T - 300) - 1.33 \cdot 10^{-4}(T - 300)^2 \text{ ети/см}^3 \quad (2)$$

$$K_1(T) \approx -4200 + 50(T - 300) - 0.2(T - 300)^2 \text{ эрг/см}^3. \quad (3)$$

Направление поля в монокристаллической пленке определяет резонансную частоту (рисунок 6а), это явная роль кубической анизотропии.

Зависимость температуры и намагниченности обусловлена температурной зависимостью ФМР в ЖИГ. При этом изменение коэффициента кубической анизотропии делает возможным уменьшить уход частоты при  $\varphi_H = 30^\circ$  (рисунок 6б).

Одноосная анизотропия, так же, как и кубическая, вносит вклад в частоту ФМР в тонких слоях. Она появляется из-за порядка расположения додипированных ионов в додекаэдрических позициях и разницы решеток ЖИГ и ГГГ. Таким образом, константа одноосной анизотропии  $K_u$  может менять знак, при увеличении рабочей температуры  $K_u$  уменьшается, что естественным образом влияет на изменения ТДЧ.

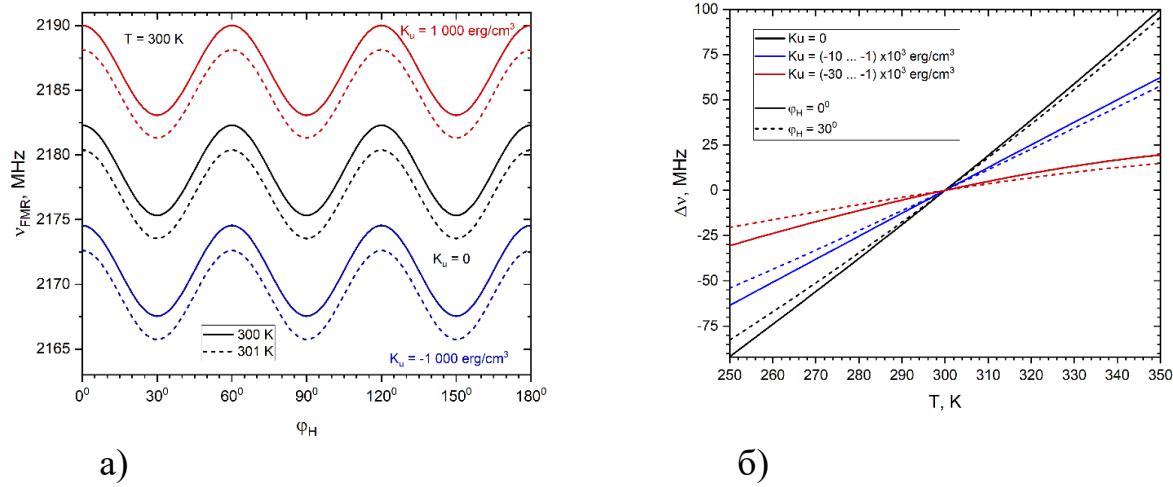


Рис. 6. Данные полученные расчетным путем, частота ФМР от угла направления магнитного поля (а) и изменение температуры (б) и частоты ФМР в поле  $H = 350\text{Э}$ .

Предприятие АО «НПП «ФАЗА» создало экспериментальные образцы ППФ, в которых были применены тонкие пленки с изменной одноосной и кубической анизотропией согласно проведенному математическому моделированию полученные результаты подтвердили расчеты, а эпитаксиальные пленки успешно применяются на производстве. АЧХ в экспериментальных приборах и их температурный сдвиг представлены на рисунке 7.

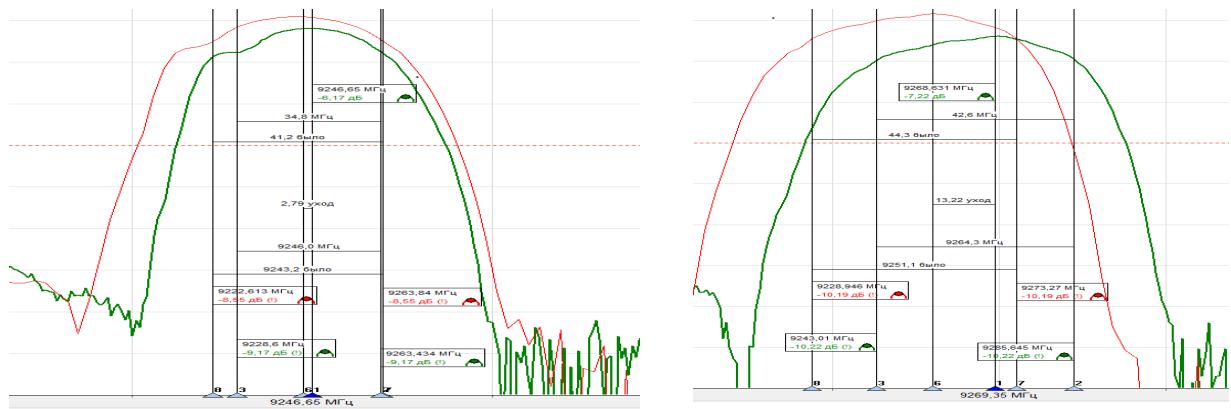


Рис.7. АЧХ экспериментальных приборов

## Заключение

Исследование свойств и возможности применения тонких пленок ЖИГ в устройствах СВЧ показало необходимость дальнейшего развития тонкопленочной технологии с применением материала ЖИГ.

Образцы фильтров показали целесообразность их применения, важная особенность фильтров состоит в стабильности амплитудо-частотной характеристики (АЧХ) в заданном диапазоне температур, что решается внесением изменений в структуру пленки.

Использование СВЧ-генераторов на планарном элементе на основе ЖИГ позволяет добиться таких характеристик, как широкая полоса перестройки и низкий уровень фазового шума, благодаря своим особым характеристикам.

Дальнейшее развитие связано с созданием новых материалов и совершенствованием конструкций для удовлетворения требований современных и перспективных систем.

## Литература

1. Бержанский В.Н., Прокопов А.Р., Семук Е.Ю. Особенности процесса намагничивания ЭПФГ с анизотропией “угловая фаза” // Уч. записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Сер. «Физика». 2007. Том. 20 (59), № 1. С.136-146.
2. Мироненко И.Г., Иванов А.А., Семенов А.А., Велькин Д.В. Щелевая линия на основе 513 нанокомпозитных сегнетоэлектрических пленок // Радиотехника, 2012, №7. С.117-122.
3. Дроздовский А.В., Устинов А.Б., Калиникос Б.А. Спектр фазовых шумов генератора, управляемого спин-волновой линией задержки // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015, В.5. С.26-28.

4. Семук Е.Ю., Бержанский В.Н., Прокопов А.Р., Голуб В.О. Ферромагнитный резонанс в феррит-гранатовых пленках с анизотропией «угловая фаза // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Сер. Физика. – Симферополь, 2008. Том. 21 (60), № 1. С.166-171.
5. Полулях С.Н., Бержанский В.Н., Семук Е.Ю., Белотелов В.И., Ветошко П.М., Попов В.В., Шапошников А.Н., Чернов А.И. Модуляция магнитоупругой связи при ферромагнитном резонансе в пленках феррит-гранатов // Журнал технической физики. – 021. Том. 91. В.7. С.1124–1131.
6. Дмитриев В. Ф., Калиникос Б. А. Возбуждение спиновых волн в перпендикулярно намагниченных ферромагнитных пленках // Журнал технической физики, 1987, Том 57, В.11. 1987, с. 2212–2220.
7. Prabhakar A., Stancil D.D. Spin waves: theory and applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. URL: [rusneb.ru/catalog/000219\\_000026\\_RU\\_ГПНТБ+России\\_IBIS\\_0000606722/](http://rusneb.ru/catalog/000219_000026_RU_ГПНТБ+России_IBIS_0000606722/)
8. Carter Ronald I., Owens John M., and De D. K. YIG Oscillators: Is a Planar Geometry Better? // IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1984. vol. 32, pp.1671-1674.
9. Shone M., The technology of YIG film growth // Circuits, Systems, and Signal Processing, 1985. Vol.4 (1-2), Pp.89–103.
10. Rodrigue G. P., Meyer H., and Jones R. V. Resonance Measurements in Magnetic Garnets // J. Appl. Phys. 1960. Vol.31, P.376.

### References

1. Berzhanskij V.N., Prokopov A.R., Semuk E.Yu. Uch. zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Ser. «Fizika». 2007. Tom. 20 (59), № 1. pp. 136-146.

2. Mironenko I.G., Ivanov A.A., Semenov A.A., Vel'kin D.V. Radiotexnika, 2012, №7. pp. 117-122.
3. Drozdovskij A.V., Ustinov A.B., Kalinikos B.A. Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij Rossii. Radioe'lektronika. 2015, V.5. pp. 26-28.
4. Semuk E.Yu., Berzhanskij V.N., Prokopov A.R., Golub V.O. Ucheny'e zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Ser. Fizika. Simferopol', 2008. Tom. 21 (60), № 1. pp. 166-171.
5. Polulyax S.N., Berzhanskij V.N., Semuk E.Yu., Belotelov V.I., Vetroshko P.M., Popov V.V., Shaposhnikov A.N., Chernov A.I. Zhurnal texnicheskoy fiziki. 021. Tom. 91. V.7. pp. 1124–1131.
6. Dmitriev V. F., Kalinikos B. A. Zhurnal texnicheskoy fiziki, 1987, Tom 57, V.11. 1987, pp. 2212–2220.
7. Prabhakar A. Spin waves: theory and applications. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. URL: [rusneb.ru/catalog/000219\\_000026\\_RU\\_ГПНТБ+России\\_IBIS\\_0000606722/](http://rusneb.ru/catalog/000219_000026_RU_ГПНТБ+России_IBIS_0000606722/)
8. Carter Ronald I., Owens John M., and De D. K. YIG. IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. Mtt-32, №12, December 1984. pp.1671-1674.
9. Shone M. Circuits, Systems, and Signal Processing, Vol.4 (1-2), 1985, Pp.89–103.
10. Rodriguez G. P., Meyer H., and Jones R. V. J. Appl. Phys. 1960. Vol.31, Pp.376.

**Дата поступления: 20.12.2025**

**Дата публикации: 20.02.2026**