

2. При расчете конструкции двухспектрального фотоприемника необходимо выбирать оптимальное соотношение между рабочими длинами волн, толщиной кристалла верхнего фотоприемника и величинами чувствительности верхнего и нижнего фотоприемников.

3. Исследованы факторы, влияющие на чувствительность верхнего фотодиода. Показано, что оптимальной является конструкция, в которой контакт с тыльной стороны кристалла выполнен в виде ячеистой структуры, в которой области, занятые металлизацией, чередуются с областями, свободными от нее. Размеры ячеек определяются размерами оптического зонда излучения с длиной волны 1,06 мкм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Заитов Ф. А., Курмашев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра.— М.: Радио и связь, 1984.  
 2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2.— М.: Мир, 1984.

3. Годованюк В. Н., Добровольский Ю. Г., Остапов О. Э. и др. Состояние и перспективы микрофотоэлектронного комплекса в Черновицком регионе Украины // Прикладная физика.— 2003.— Вып. 3.— С. 72—83.  
 4. Ашеулов А. А., Годованюк В. Н., Добровольский Ю. Г. и др. Оптимизация надежности кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодов по темновому току // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1999.— № 1.— С. 35—38.  
 5. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорокин К. В. О влиянии сопротивления поверхностного канала на темновой ток квадрантных  $p-i-n$ -фотодиодов на кремнии // Прикладная физика.— 1999.— Т. 2.— С. 79—85.  
 6. Ашеулов А. А., Добровольский Ю. Г., Безулик В. А. Воздействие электрического и магнитного полей на параметры полупроводниковых приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2000.— № 1.— С. 33—35.  
 7. Добровольский Ю. Г., Комаров Е. В., Биксей М. П. Кремниевый фотодиод для двухспектрального фотоприемного устройства / Тр. Второй междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии» ("СИЭТ-2001").— Одесса.— 2001.— С. 321—322.  
 8. ГОСТ 17772—88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик.— М.: Изд-во стандартов.— 1988.

*Д. т. н. С. И. ЮЦУК, к. ф.-м. н. С. А. ЮРЬЕВ,  
 П. С. КОСТЮК, В. И. БОНДАР*

Украина, НУ "Львовская политехника"  
 E-mail: syuryev@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
 15.03 2005 г.  
 Оппонент *к. т. н. К. В. МАЛЫШЕВ*  
 (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

## ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРОГРАНАТОВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

*На основе выращенных пленок железитриевого граната разработаны СВЧ полосно-пропускающие фильтры, линии задержки для использования в СВЧ-электронике.*

Проблема микроминиатюризации узлов и устройств радиоэлектронной аппаратуры не может быть решена без качественно новых материалов, к которым принадлежат феррогранатовые эпитаксиальные структуры (ФЭС). Применение ФЭС в сверхвысоко-частотной электронике вместо объемных монокристаллических резонаторов снижает производственные затраты, улучшает параметры приборов, позволяет использовать технологию интегральных схем, приводит к уменьшению габаритов и повышению надежности СВЧ-узлов [1—3].

Принцип работы устройств СВЧ-техники, создаваемых с использованием ФЭС, базируется как на однородном типе прецессии спинов [4], так и на распространении в ферритовой среде магнитостатических волн (МСВ) [5]. Характеристики распространения МСВ зависят от степени однородности внутреннего магнитного поля в кристалле, а величина потерь при этом непосредственно связана с качеством феррогранато-

вых пленок, которое определяется шириной линии ( $\Delta H$ ) ферромагнитного резонанса (ФМР), однородностью химического состава, толщины и магнитных параметров по площади пленки, стабильностью этих параметров в интервале рабочих температур.

Выращиваемые нами феррогранатовые пленки характеризуются широким диапазоном толщины и намагниченности, узкими линиями ФМР и малыми магнитными потерями, низкой дефектностью, однородностью по толщине и магнитным параметрам, повышенной термостабильностью намагниченности и резонансной частоты [6—8].

### Выращивание эпитаксиальных феррогранатовых пленок

Пленки выращивали путем изотермического погружения монокристаллических подложек из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) ориентации (111) в перенасыщенный раствор-расплав ферритовой шихты с использованием растворителя  $PbO-V_2O_5$ . Подложки вырезали из монокристалла ГГГ, выращенного по методу Чохральского, с последующей их шлифовкой и полировкой до 14-го класса чистоты. Толщина подложек составляла 0,5 мм. Для эпитаксиального выращивания использовали автоматизированную установку с компьютерным управлением технологиче-

скими операциями. Точность поддержания температуры в зонах печи составляла  $\pm 0,1$  К. Толщина выращенных пленок находилась в интервале от единиц до десятков микрон.

Исследования структуры и состава эпитаксиальных пленок выполняли с помощью электронного микроскопа с рентгеновским микроанализатором «Сомбах». Измерение параметров ферромагнитного резонанса (в том числе и намагниченности насыщения) тонких пленок (единицы микрон) выполняли на образцах-резонаторах круглой формы диаметром от 1 до 5 мм, которые изготавливали из ФЭС методом ультразвуковой и механической резки и химического травления [9].

Отметим, что при изготовлении резонатора с помощью ультразвуковой и механической резки возникает дефектность по его периметру, которая вызывает появление многих мод в СВЧ-спектре с ненулевыми волновыми векторами в узком диапазоне частот. В то же время при химическом травлении отсутствие дефектов на краях резонатора позволяет наблюдать на нем однородный ферромагнитный резонанс (рис. 1). Что касается ширины линии ферромагнитного резонанса, величина которой определяет магнитные потери, то для резонаторов с толщиной пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ)  $Y_3Fe_5O_{12}$  в пределах 1,8...2,7 мкм, изготовленных ультразвуковой резкой, она составляла 1,2...1,7 Э, а для резонаторов, полученных химическим травлением, — 0,35...0,55 Э.

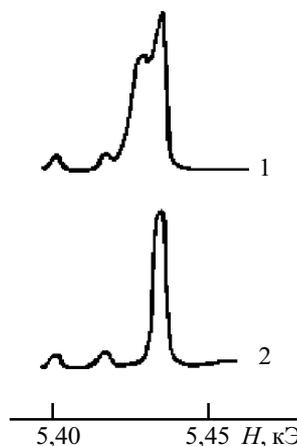


Рис. 1. Спектры ферромагнитного резонанса двух образцов диаметром 1 мм с толщиной слоя ЖИГ 3 мкм, изготовленных с помощью ультразвуковой резки (1) и химического травления (2)

Измерение параметров ферромагнитного резонанса толстых феррогранатовых пленок (десятки микрон) выполняли неразрушающим методом «магнитная яма» [10, 11]. Он заключается в создании в ферритовой пленке локализованной области круглой формы диаметром 1...2 мм, в которой выполняются условия ферромагнитного резонанса. Для пленок ЖИГ толщиной от 50 до 92 мкм ширина линии ферромагнитного резонанса, измеренная методом «магнитной ямы», находилась в пределах от 0,55 до 1,28 Э.

#### Изготовление волноводных элементов и резонаторов из ФЭС

Скорость распространения магнитоэлектрических волн на два-четыре порядка меньше скорости распространения электромагнитных волн, что позволяет создавать на основе ФЭС компактные устройства с использованием технологии гибридных и монолит-

ных интегральных схем. Линии задержки (ЛЗ), в том числе и дисперсионные ЛЗ, фильтры, направленные ответвители, — вот лишь некоторые примеры из перечня таких устройств [12—15]. Устройства на магнитоэлектрических волнах служат для распознавания, контроля и обработки сигналов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [16].

Наилучшей средой для распространения магнитоэлектрических волн являются монокристаллические пленки ЖИГ [17]. В некоторых устройствах на поверхности пленок ЖИГ формируют отражающие решетки в виде канавок. Такие решетки используются для управления дисперсией волн и при создании некоторых типов фильтров и резонаторов. При формировании канавок на ферритовой пленке необходимо обеспечить вертикальный профиль травления, получить определенную глубину и ширину канавки с высокой точностью и воспроизводимостью.

Отдельные волноводные структуры ЖИГ можно изготавливать механическим вырезанием из диска ФЭС элемента определенной конфигурации и заданных размеров. Однако резка приводит к частичному разрушению сопредельного слоя ферритовой пленки и вызывает механические напряжения, отрицательно влияющие на ее параметры. Поэтому промышленные методы изготовления волноводных структур, на наш взгляд, также должны основываться на травлении пленок ЖИГ с последующим механическим разделением элементов, получаемых на общей ФЭС [9].

В работе [18] приведены результаты исследования ионно-лучевого, жидкостно-химического и лазер-стимулированного травления пленок ЖИГ. Ионно-лучевое травление выполняли на установке ионно-химического травления ИИ-4-015 с источником ионов «Радикал». Скорость травления пленок ЖИГ составляла  $2 \cdot 10^{-4}$  мкм/с. В качестве защитной маски использовали двухслойную систему — пленки титана и фоторезиста ФП-383. Этот способ полностью соответствует требованиям, предъявляемым к формированию в пленках ЖИГ канавок глубиной до 1 мкм для отражающих структур.

Жидкостно-химическое травление пленок ЖИГ осуществляли в горячей ортофосфорной кислоте. Роль защитной маски выполняла пленка  $SiO_2$ , которую наносили разными способами: высокочастотным распылением мишени, осаждением из паровой фазы и пиролизным осаждением в реакторе пониженного давления. Наиболее качественные маскирующие пленки  $SiO_2$  получены последним из методов. Жидкостно-химическое травление пленок ЖИГ является многофакторным процессом, зависящим от температуры травителя, времени выдержки травителя при данной температуре, скорости притока новых порций травителя к поверхности пленки, наличия механических напряжений в структуре пленки. Скорость травления пленок ЖИГ при температуре травителя 540 К достигала 0,2 мкм/с.

Перспективным фактором при травлении феррогранатовых пленок является использование лазерного излучения для стимулирования гетерогенных химических процессов [19—21]. Мы провели испытания процесса жидкостно-химического травления пле-

нок ЖИГ, стимулированного излучением аргонового лазера с диапазоном волн  $\lambda=488...514$  нм. Коэффициент поглощения ЖИГ на длине волны 500 нм составляет  $5200 \text{ см}^{-1}$ . Излучение лазера фокусировали на поверхность ФЭС ЖИГ, помещенной во фторопластовую ванну, заполненную ортофосфорной кислотой. Ванна с помощью электропривода перемещалась относительно лазерного луча со скоростью 24 мкм/с. Эффективная скорость травления достигала 20 мкм/с при мощности лазерного луча 0,6 Вт. Поскольку на длине волны 500 нм галлий-гадолиниевый гранат практически не поглощает лазерного излучения, то процесс травления пленки ЖИГ заканчивается на границе с подложкой из ГГГ. Метод представляет значительный интерес для изготовления отдельных волноводных структур.

### Устройства СВЧ-электроники на ФЭС

На основе выращенных нами пленок ЖИГ были разработаны СВЧ полосно-пропускающие фильтры и линии задержки, пригодные для создания навигационной, геофизической и радиолокационной аппаратуры. На рис. 2 показан микрополосковый полосно-пропускающий фильтр на основе пленки ЖИГ с  $\Delta H=0,5$  Э с элементами связи в виде двух короткозамкнутых отрезков микрополосковой линии (МПЛ).

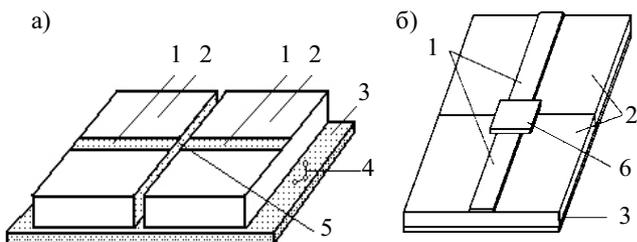


Рис. 2. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр с элементами связи в виде двух короткозамкнутых МПЛ: 1 — короткозамкнутые МПЛ шириной 1 мм и сопротивлением 50 Ом; 2 — поликоровая подложка размерами 64×32 мм; 3 — латунное основание; 4 — разьединитель; 5 — металлизированные торцы; 6 — ФЭС

Испытания показали, что фильтр позволяет осуществлять электрическую перестройку в широком диапазоне частот (от 1 до 15 ГГц). Основное преимущество таких фильтров заключается в том, что они обладают высоким (выше 35 дБ) уровнем развязки между элементами связи, который практически не зависит от частоты в интервале 1...10 ГГц.

Ставилась задача установить оптимальные геометрические размеры ФЭС для достижения минимальных потерь в полосе пропускания фильтра. Минимальные потери зависят от собственных потерь в ферритовой пленке и от величины коэффициентов связи пленки с микрополосковыми короткозамкнутыми отрезками. Как уже отмечалось, потери в пленке характеризуются шириной линии ФМР: чем меньше  $\Delta H$ , тем выше собственная добротность образца ( $Q$ ), которая для случая приложения постоянного магнитного поля перпендикулярно плоскости пленки определяется выражением

$$Q = \frac{f}{\gamma \cdot \Delta H},$$

где  $f$  — резонансная частота, а  $\gamma$  — гиромагнитное отношение.

На рис. 3 приведена зависимость потерь ( $L$ ) на центральной частоте фильтра от длины ФЭС ( $l$ ) и от толщины пленки ЖИГ ( $h$ ).

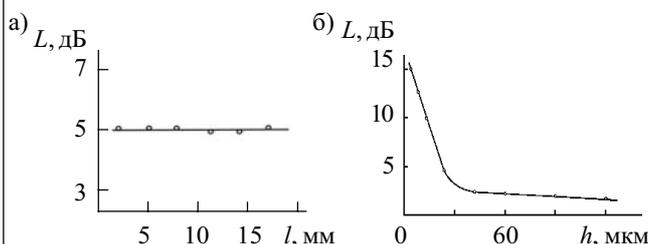


Рис. 3. Зависимость потерь на центральной частоте фильтра от длины ФЭС (а) и от толщины пленки ЖИГ (б)

Из рис. 3, а следует, что область образца, переизлучающая энергию из одного отрезка МПЛ в другой, мала и находится над местом стыка короткозамкнутых отрезков МПЛ. Следовательно, ферритовый пленочный резонатор имеет постоянную связь с линией передачи, и величина этой связи не зависит от размеров ферритового элемента.

Из рис. 3, б видно, что наибольшее влияние на потери в фильтре оказывает толщина феррогранатовой пленки. Были достигнуты минимальные потери порядка 2 дБ на центральной частоте фильтра и максимальные значения коэффициентов связи на пленках ЖИГ с толщиной, большей чем 25 мкм.

В работах [5, 22] наши ферритовые эпитаксиальные структуры ЖИГ были использованы для создания узкополосных СВЧ-фильтров, предназначенных для устройств обработки радиосигналов. СВЧ-сигнал, который подается на вход фильтра, вызывает магнито-статические колебания в ферритовых пленочных резонаторах. За счет магнитострикции феррита эти магнито-статические колебания возбуждают в диэлектрических подложках упругие акустические волны. На выход фильтра поступают лишь те сигналы, которые соответствуют частотам акустических резонансов.

Еще одним устройством, созданным на основе наших ФЭС, является линия задержки. При испытаниях ЛЗ установлено, что она позволяет осуществлять электрическую перестройку времени задержки сигнала от 10 до 200 нс, характеризуется невзаимностью характеристик и обладает малыми потерями. Габариты разработанной ЛЗ в четыре раза меньше, чем у известных аналогов [23, 24].

### Выводы

1. Методы изготовления феррогранатовых пленочных резонаторов и других волноводных структур должны использовать химическое травление, поскольку механические и ультразвуковые способы резки приводят к частичному разрушению структур и возникновению механических напряжений в ферритовой пленке.

2. Из-за низкой скорости ( $2 \cdot 10^{-4}$  мкм/с) процессов ионного травления пленок железиттриевого граната целесообразно применять его для формирования структур устройств на магнито-статических вол-

нах на отражающих канавках с вертикальным профилем и глубиной до 1 мкм.

3. Жидкостно-химическое травление характеризуется более высокой скоростью ( $2 \cdot 10^{-1}$  мкм/с при  $T=540$  К) по сравнению с ионным травлением и может быть использовано при формировании элементов структур из пленок ЖИГ толщиной до 10 мкм непосредственно на подложках из галлийгадолинивого граната.

4. При травлении пленок ЖИГ толщиной более 10 мкм, а также при изготовлении отдельных элементов устройств на МСВ, перспективным, на наш взгляд, является метод лазер-стимулированного травления, эффективная скорость которого при определенных условиях в сотни раз превышает скорость жидкостно-химического травления.

5. На основе изготовленных феррогранатовых эпитаксиальных структур изготовлен ряд планарных устройств СВЧ-электроники.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны.— М.: Наука, 1994.
2. Гласс Х. Л. Ферритовые пленки для СВЧ-устройств // Труды института инженеров по электронике и радиоэлектр.— 1988.— Т. 76, № 2.— С. 64—72.
3. Marcelli R., Rossi M., Degasperis P. Microwave magnetostatic wave coupled resonators // Journ. Magnetism and Magnetic Mater.— 1996.— Vol. 158.— P. 471—472.
4. Бокаленко И. Ю., Гуревич А. Г., Костюк П. С., Краснов Е. С. Фильтры на ферритовых пленках // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудование.— 1981.— Вып. 2.— С. 45—48.
5. А. с. 1681345 СССР. Узкополосный СВЧ-фильтр / П. Е. Зильберман, П. С. Костюк, Б. Т. Семен и др.— 1991.— Бюл. № 36.
6. Юшук С. И. Монокристаллические феррогранатовые пленки для микроволновой электроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1998.— № 1.— С. 35—38.
7. Юшук С. И., Костюк П. С., Лопатинский И. Е. Феррогранатовые пленки с повышенной термостабильностью магнитных параметров // Журн. техн. физ.— 1998.— Т. 68, № 9.— С. 46—50.
8. Юшук С. И., Костюк П. С. Монокристаллические пленки феррогранатов с повышенной термостабильностью намагниченности и поля ферромагнитного резонанса // Письма в Журн. техн. физ.— 2001.— Т. 27, вып. 3.— С. 49—53.

9. Юшук С. И., Костюк П. С. Особенности исследования ферромагнитного резонанса в ферритовых эпитаксиальных структурах // Приборы и техн. экспер.— 1996.— № 6.— С. 91—93.

10. Калинин Б. А., Ковшиков Н. Г., Кожусь Н. В. Локальные измерения сверхвысокочастотных магнитных потерь в ферродиелектрических пленках // Тез. докл. VIII Всесоюз. школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники».— Донецк.— 1982.— С. 319.

11. Солоухин Н. Г., Брагин С. М., Тугарин В. Г. Радиоволновые методы и аппаратура для контроля параметров магнитных пленок // Обзоры по электрон. техн. Сер. Материалы.— 1989.— Вып. 1.— С. 32—48.

12. Jun S., Pelzi J. A tunable microwave source using nonlinear magnetostatic surface waves in magnetic garnet films // Journ. de Physique.— 1997.— Vol. 7, С. 1.— P. 399—400.

13. Натхин И. И., Попина С. М., Симанчук Б. П. Перестраиваемый полосно-заграждающий фильтр // Тез. докл. регион. конф. «Спинволновые явления электроники СВЧ».— Краснодар.— 1987.— С. 167—168.

14. Вугальтер Г. А. Резонатор на поверхностных спиновых волнах // Радиотех. и электроника.— 1980.— Т. 25, № 7.— С. 1376—1383.

15. Филинюк Н. А. Температурная стабилизация активного СВЧ-фильтра // Радиотехника.— 1980.— Т. 35, № 12.— С. 47—49.

16. Вапнэ Г. М. СВЧ-устройства на магнитостатических волнах // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.— 1984.— Вып. 8.— С. 1—79.

17. Яковлев Ю. М. Гранатовые эпитаксиальные структуры спинволновой электроники // Обзоры по электронной технике. Сер. Материалы.— 1986.— Вып. 7.— С. 1—56.

18. Юшук С. И., Юрьев С. А., Якивчук А. И. и др. Формирование элементов из пленок железо-иттриевого граната для устройств на магнитостатических волнах / Тез. докл. XI Всесоюз. школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». Ч. 1.— Ташкент.— 1988.— С. 169—170.

19. Ando K., Tsukahara S. Selective removal of iron garnet film on transparent substrate by laser etching // Jap. Journ. Appl. Phys.— 1982.— Vol. 21, N 6.— P. L347—L348.

20. Готра З. Ю., Лукоянов С. А., Смеркло Л. М. Лазерно-стимулированное травление в технологии ИС // Зарубежная электронная техника.— 1986.— № 6.— С. 3—55.

21. Готра З. Ю., Бобицкий Я. В. Лазерні методи обробки в мікроелектроніці.— Львів: Світ, 1991.

22. А. с. 1681346 СССР. Узкополосный СВЧ-фильтр / П. Е. Зильберман, П. С. Костюк, Б. Т. Семен и др.— 1991.— Бюл. № 36.

23. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике.— М.: Сов. радио, 1975.

24. Шехтман Ф. И. Перспективы использования устройств на магнитостатических волнах для аналоговой обработки СВЧ-сигналов // Радиоэлектроника за рубежом.— 1979.— Вып. 25.— С. 9—23.

## Руководителям предприятий, фирм и организаций

Карьера-центр предлагает содействие в конкурсном отборе и трудоустройстве студентов и выпускников вузов

**Приглашаем работодателей к участию в Ярмарках Карьеры!**

Наш адрес: 65044, г. Одесса, пр. Шевченко, 1,  
ОНПУ, корп. "Р", к. 318р.  
Тел. (0482) 288-972, тел./факс (048) 724-17-96.

E-mail: [career@ospu.odessa.ua](mailto:career@ospu.odessa.ua)  
<http://www.ospu.odessa.ua/univer/career>