

# Функциональные элементы магнонных сетей на основе гетероструктур YIG/AlO<sub>x</sub>/GaAs с латеральным и вертикальным спин-волновым транспортом

А.В. Садовников<sup>1</sup>, Е.Н. Бегинин<sup>1</sup>, С.Е. Шешукова<sup>1</sup>, А.И. Стогний<sup>2</sup>, Ю.П.Шараевский<sup>1</sup>, С.А. Никитов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению

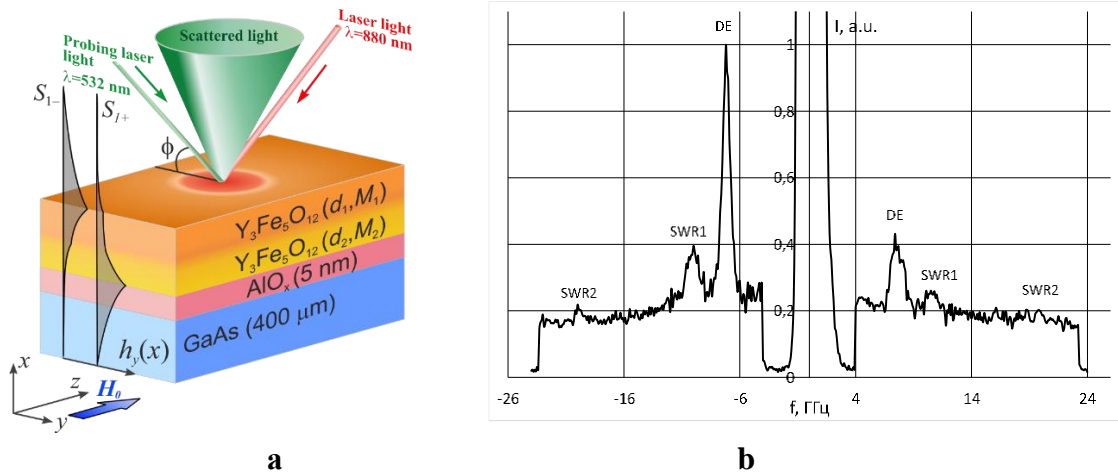
**Аннотация:** в данной работе было проведено комплексное исследование образцов гетероструктур на основе супертонких слоев железо-иттриевого граната (YIG), выращенных на поверхности высоко-резистивного полупроводникового субстрата. В качестве буферного подслоя был использован AlO<sub>x</sub> толщиной 10-20 nm. Слои YIG были синтезированы методом распыления ионным пучком. Были изучены особенности взаимодействия термически возбуждаемых спин-волновых волн в слоях YIG с электронами проводимости полупроводникового субстрата методом Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния фотонов на магнонах.

**Ключевые слова:** спиновые волны, железо-иттриевый гранат, управление спиновыми волнами, магноника

## 1. Введение

В последнее время большой интерес представляет исследование свойств спиновых волн (СВ) при их распространении в магнитных волноведущих структурах микронных и нанометровых размеров [1-2]. При этом основное внимание уделяется использованию СВ в качестве носителей информационных сигналов, поскольку в этом случае удастся реализовать целый ряд устройств обработки сигнала на принципах магноники [3-7]. Как известно, свойства СВ определяются дипольным и обменным взаимодействием в магнитных средах и могут значительно меняться при изменении параметров среды, например, величины и направления поля подмагничивания. В то же время путем структурирования тонких магнитных пленок удастся управлять свойствами СВ при использовании как геометрических эффектов, возникающих при волноводном распространении СВ, так и свойств анизотропии формы магнитных структур, проявляющихся в изменении локальных характеристик, например, величины внутренних магнитных полей [1,2]. В настоящей работе рассмотрено применение экспериментального метода Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии (МБС) для исследования тонких пленок железо-иттриевого граната (YIG) на полупроводниковых подложках GaAs (рис.1). Приведены результаты исследования спин-волновых резонансов и дипольно-обменный спиновых волн в латеральных, нерегулярных и композитных магнитных микроструктурах. Продемонстрированы линейные и нелинейные режимы распространения спиновых волн в микроструктурах [5-7]. Рассмотрены эффекты связи спиновых волн в многослойных ферромагнитных структурах на полупроводниковых подложках. Исследованы методы управления лазерным излучением характеристиками спин-волновых возбуждений и показана возможность индуцированной лазером невязимости спин-волновых процессов. Обсуждаются примеры использования магнонных структур и их интеграции с полупроводниковыми элементами для систем

обработки информационных сигналов.



**Рисунок 2.** а) Схема исследуемой структуры. б) Спектры термически возбуждаемых магнонов в гетероструктуре YIG/AlO<sub>x</sub>/GaAs при магнитном поле  $H=2$  кЭ. DE- области поверхностных дипольно-обменных волн; SWR1, SWR2 – области многомодовых объемных дипольно-обменных волн с индексами  $n=1$  и  $n=2$ , соответственно.

## 2. Результаты экспериментального исследования

Исследуемые магнитные структуры, синтезированные методом распыления ионным пучком на поверхности n-типа GaAs-субстрата. С помощью растрового сканирующего электронного микроскопа проведена характеристика поверхностей и поперечных сечений образцов исследуемых гетероструктур. Показано, что слои YIG имеют поликристаллическую структуру и представляют собой совокупность кристаллитов различных размеров. В зависимости от образцов, толщины поликристаллических слоев YIG имели величину порядка 260-460 нм с размерами кристаллитов в диапазоне величин 5-30 нм. Методом МБС в конфигурации обратного рассеяния исследованы зависимости спектров термически возбуждаемых магнонов (некогерентных тепловых магнонов) от величины внешних статических полей при касательном намагничивании гетероструктурах типа YIG/AlO<sub>x</sub>/GaAs. Показано, что спектр термически возбуждаемых магнонов включает в себя спектр поверхностных дипольно-обменных спиновых волн (в магнитоэлектронном приближении им соответствуют волны Дэймона-Эшбаха) и спектр многомодовых объемных дипольно-обменных спиновых волн с модовыми индексами  $n=1$ ,  $n=2$  (Рис. 2). Для теоретического анализа спектров тепловых магнонов была использована модель двуслойной пленки для дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных ферромагнитных пленках со свободными спинами на интерфейсах [9,10]. По экспериментальным данным и результатам используемой теоретической модели было установлено, что наблюдаемые в гетероструктуре спектры объемных спиновых волн соответствуют случаю спектров волн в обменно-несвязанных слоях YIG с различными намагниченностями и толщинами. По характерным частотам спектров объемных спиновых волн, полученных в пределе малых значений волновых чисел, определены эффективные толщины магнитных слоев с различными намагниченностями насыщения. Для субслоя с намагниченностью 1.397 кЭ получена эффективная толщина  $d_1=54$  нм, для субслоя с намагниченностью 1.1395 кЭ получена эффективная толщина  $d_2=60$  нм. Полученная суммарная толщина 114 нм поликристаллического слоя YIG несколько меньше результатов, полученных в ходе характеристики образца структуры с помощью сканирующего электронного микроскопа. Различие в результатах объясняется невозможностью точного определения границ буферных слоев, используемых при синтезе YIG на поверхности

GaAs и невозможностью устранения эффектов параллакса в электронном микроскопе. Методом МБС проведено экспериментальное исследование зависимостей характерных частот термически возбуждаемых магнонов от величины магнитного приложенного касательно к плоскости гетероструктуры. Показано хорошее соответствие результатов теоретических и экспериментальных исследований перестройки характерных частот спиновых волн внешним магнитным полем.

### 3. Заключение

Таким образом, на основе экспериментально полученных дисперсионных характеристик спиновых волн в касательно намагниченной структуре YIG/AlOx/GaAs. Показано, что при облучении лазером с длиной волны 830 нм частоты спин-волновых резонансов не изменяются, в то время, как частоты дипольно-обменных спиновых волн для фиксированного значения волнового числа увеличиваются на величину порядка 100 МГц и более. На основе исследования методом МБС показано, что в рассматриваемых структурах оказывается возможным управление свойствами невзаимности путем локального лазерного воздействия на полупроводниковый субстрат, что позволяет интегрировать структуры YIG/AlOx/GaAs с полупроводниковыми элементами для систем обработки информационных сигналов.

Экспериментальное исследование методом Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии распространения спиновых волн в вертикально и латерально связанных структурах и исследование механизмов управления связью спиновых волн с помощью лазерного излучения выполнено в рамках **гранта Российского научного фонда** (№18-79-00198). Изготовление структур осуществлено при поддержке **гранта РФФИ** (№16-29-03120).

#### Список литературы

1. Kruglyak, V.V. Magnonics / V.V. Kruglyak, S.O. Demokritov, and D. Grundler // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2010. — Vol. 43. — P.264001.
2. Demidov, V.E. Spin-current nano-oscillator based on nonlocal spin injection / V.E. Demidov [et al.] // Sci. Rep. — 2015. — Vol. 5. — P. 8578.
3. Demidov, V.E. Nanoconstriction-based spin-Hall nano-oscillator / V.E. Demidov [et al.] // Appl. Phys. Lett. — 2014. — Vol. 105. — P. 172410.
4. Demidov V.E. Dipolar field-induced spin-wave waveguides for spin-torque magnonics / V.E. Demidov [et al.] // Appl. Phys. Lett. — 2015. — Vol. 106. — P. 022403.
5. Sadovnikov, A. V. Magnon straintronics: Reconfigurable spin-wave routing in strain-controlled bilateral magnetic stripes / A.V. Sadovnikov, [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2018. — Vol. 120. — P. 257203.
6. Sadovnikov, A. V. Spin-wave intermodal coupling in the interconnection of magnonic units/ A.V. Sadovnikov, [et al.] // Appl. Phys. Lett. — 2018. — Vol. 112. — P. 142402.
7. Sadovnikov, A. V. Spin-wave drop filter based on asymmetric side-coupled magnonic crystals/ A.V. Sadovnikov, [et al.] // Phys. Rev. Applied — 2018. — Vol. 9. — P. 051002.
8. Sadovnikov, A. V. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure/ A.V. Sadovnikov, [et al.] // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99. — P. 054424.
9. Rezende, S. M. Studies of coupled metallic magnetic thin-film trilayers / S. M. Rezende, [et al.] // J. Appl. Phys. — 1998. . — Vol. 84. . — P. 958.
10. Bongiani, W.L. Magnetostatic Propagation in a Dielectric Layered Structure / W. L. Bongiani // J. Appl. Phys. — 1972. — Vol. 43. — P. 2541.