

Исследование распределения постоянного магнитного поля в нормально намагниченных ферритовых волноводах

Д.А. Хрошин, А.Б. Устинов

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в ходе исследования были изучены распределения постоянного внутреннего магнитного поля в нормально намагниченных ферритовых волноводах из железо-иттриевого граната. Теория, используемая при моделировании, основывается на методе эффективных размагничивающих факторов, значения которых считались с помощью тензора статических функций Грина. Работа содержит анализ влияния различных параметров волновода, таких как толщина и на форму результирующего постоянного магнитного поля.

Ключевые слова: магнитное поле, ферритовая плёнка, неоднородность.

1. Введение

В последнее десятилетие наблюдается возрастающий интерес к спин-волновой электронике, связанный с уникальной природой материалов, составляющих эту область науки. Дело в том, что в них нет носителей электрических зарядов, из чего следует отсутствие потерь на джоулево тепло. Подобный феномен приводит к уменьшению энергопотребления, что является перспективой для реализации электронной компонентной базы на новых физических принципах, например, для систем обработки информационных сигналов [1].

Свойства материалов спин-волновой электроники зависят от направления и величины внутреннего магнитного поля $\vec{H}_{int}$, которое формируется за счёт внешнего поля $\vec{H}_{ex}$. Одним из способов определения связи между ними является метод эффективных размагничивающих факторов [2]. Тогда выражение для внутреннего магнитного поля имеет вид

$$\vec{H}_{int} = \vec{H}_{ex} - N\vec{M}_0 = \vec{H}_{ex} + \vec{H}_d \quad (1)$$

В приближении малого эллипсоида [3], характеризующего собой бесконечную в плоскости плёнку, и совмещения его осей симметрии с системой координат, тензор эффективных размагничивающих факторов N в (1) становится диагональным, а величина $\vec{H}_{int}$ зависит от направления $\vec{H}_{ex}$. Такой метод справедлив при условии бесконечности образца в одной из плоскостей и является приближенным к верному при большом отношении ширины w/L к толщине L плёнки. При небольших отношениях w/L внутреннее магнитное поле становится неоднородным. Это условие не позволяет пользоваться удобным для оценки приближением эллипсоида и требует расчёта распределения внутреннего поля с учётом геометрических ограничений. Для того чтобы подчеркнуть ранее описанную особенность, плёнки с отношением w/L порядка 10, далее будут называться волноводами.

Целью данной работы является исследование распределения $\vec{H}_{int}$ внутри образца и выявление влияния геометрических параметров структуры на его вид. В качестве направления внешнего поля был взят случай нормально намагниченного волновода.

Материалом, параметры которого послужили для расчёта, был железо-иттриевый гранат (ЖИГ), с намагниченностью насыщения $M_0 = 1750$ Гс.

2. Постановка задачи

На рисунке 1 схематически изображена исследуемая модель и её взаимное расположение с системой координат.

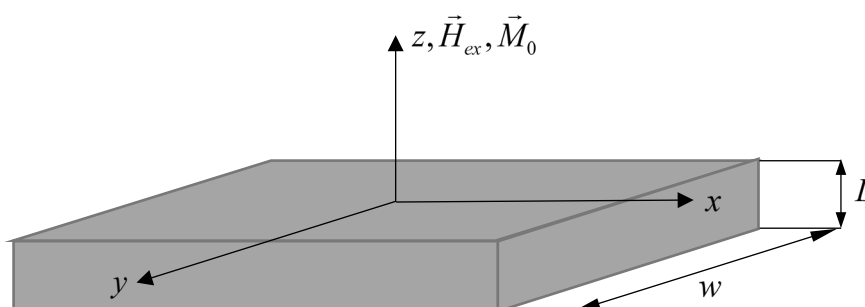


Рисунок 1. Взаимное расположение волновода и системы координат

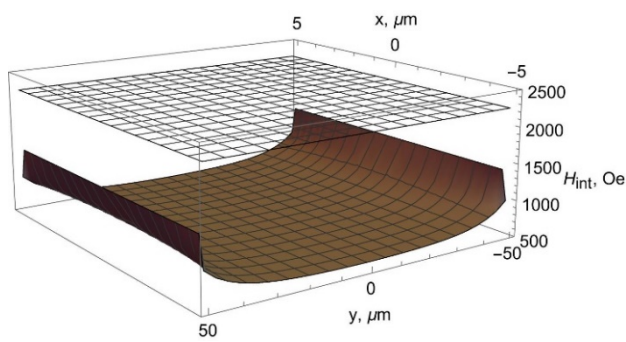
Метод исследования был построен на теории тензорных функций Грина, суть которого в поиске решения уравнений Максвелла, связывающего магнитное поле и намагниченность [4]. В итоге, полученное соотношение имеет вид

$$\vec{H}_d(y, z) = \int_{-L/2}^{-L/2} \int_{-w/2}^{w/2} \mathbf{G}(y, y', z, z') \vec{M}_0(y', z') dy' dz', \quad (2)$$

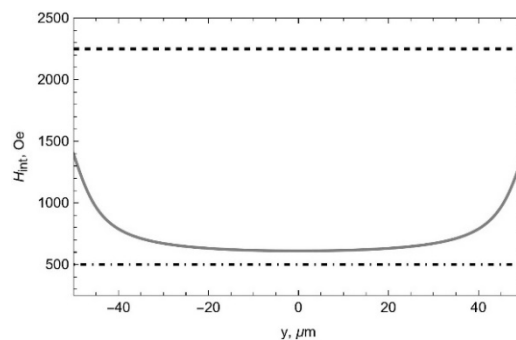
где $\mathbf{G}(y, y', z, z')$ – тензор статических функций Грина, получаемый путем приравнивая продольного волнового числа к нулю в формулах для компонент тензора функций Грина в работе [5]. Условия поставленной задачи строго определяют направление намагниченности насыщения, поэтому она не является функцией координат, что позволяет вынести её из подынтегрального выражения. После вычисления интеграла, перемножения полученной матрицы на орт, вдоль оси которого направлена намагниченность и учитывая направление внешнего магнитного поля получаем из (2) известное ранее выражение, найденное другим способом в работе [6].

3. Результаты исследования

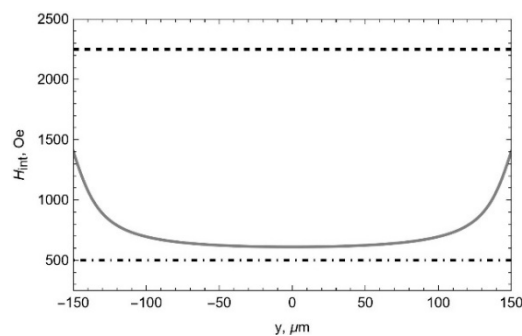
Ниже представлены рисунки с результатами моделирования распределений внутреннего магнитного поля по формуле (1) с учетом (2) и сравнение этих результатов с приближением эллипсоида. В качестве значения внешнего магнитного поля была взята напряженность $H_{ex} = 2500$ Э.



а)

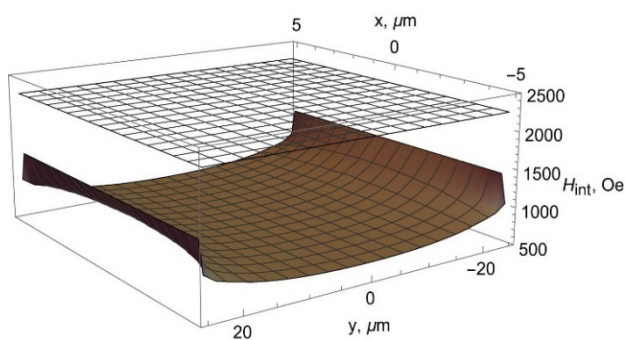


б)

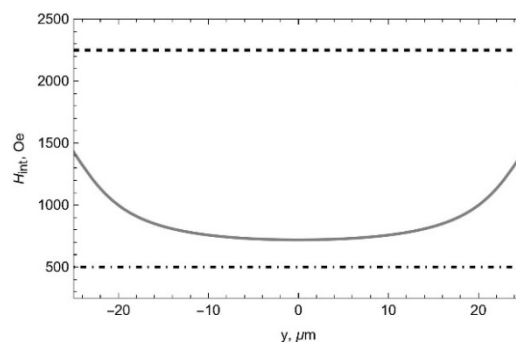


в)

Рисунок 2. Распределение внутреннего магнитного поля по сечению нормально намагниченного ферритового волновода (сплошная линия) с внешним магнитным полем (пунктирная линия) и результатом расчёта в приближении эллипсоида (пунктирная линия с точкой): а) по всему сечению волновода с $w = 100$ мкм и $L = 10$ мкм, б) в сечении при $x = 0$ с $w = 100$ мкм и $L = 10$ мкм, в) в сечении при $x = 0$ с $w = 300$ мкм и $L = 30$ мкм



а)



б)

Рисунок 3. Распределение внутреннего магнитного поля по сечению нормально намагниченного ферритового волновода (сплошная линия) с внешним магнитным полем (пунктирная линия) и результатом расчёта в приближении эллипсоида (пунктирная линия с точкой): а) по всему сечению волновода с $w = 50$ мкм и $L = 10$ мкм, б) в сечении при $x = 0$ с $w = 50$ мкм и $L = 10$ мкм

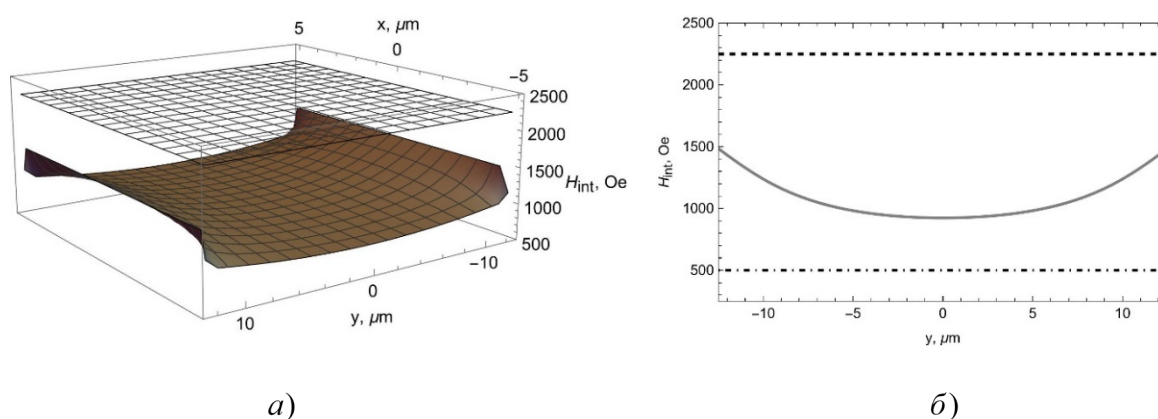


Рисунок 4. Распределение внутреннего магнитного поля по сечению нормально намагниченного ферритового волновода (сплошная линия) с внешним магнитным полем (пунктирная линия) и результатом расчёта в приближении эллипсоида (пунктирная линия с точкой): *а)* по всему сечению волновода с $w = 25$ мкм и $L = 10$ мкм, *б)* в сечении при $x = 0$ с $w = 25$ мкм и $L = 10$ мкм

Результаты моделирования (рис. 2 – 4) демонстрируют влияние геометрических размеров на степень неоднородности внутреннего магнитного поля. Анализ рисунка 2 (б, в) приводит к выводу о том, что само распределение зависит не от абсолютных значений w и L , а от их отношения. Зависимости, изображённые на рисунках 3 и 4 показывают, что при повышении значения отношения ширины к толщине, поле в волноводе стремится к полю в плёнке и приближение эллипсоида становится справедливым. В обратном случае оно даёт сильно заниженный результат (рис. 3).

Немаловажный эффект небольшой величины w/L – неоднородность магнитного поля у краёв образца, проявляющаяся в виде завышенной относительно среднего по ширине значения напряжённости.

4. Заключение

Таким образом, исследование показывает, что геометрические размеры волновода сильно влияют на форму распределения внутреннего магнитного поля и при уменьшении w/L оценочный по приближению эллипсоида результат становится некорректным.

Работа выполнена при **частичной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № ФСЭО-2025-0008).**

Список литературы

1. Никитов С. А. и др. Диэлектрическая магнони́ка—от гигагерцев к терагерцам //Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 10. – С. 1009-1040.
2. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. – 1973.
3. Френкель Я. И. Электродинамика Л. – М.: ОНТИ, 1935. Т.2
4. Вендик О. Г., Чарторижский Д. Н. Дисперсионное уравнение для неоднородных колебаний намагниченности в ферромагнитной пластине. // ФТТ. – 1970. – Т.12, №5. – С.1538-1540.
5. Grigoryeva N., Popov D., Kalinikos B. EPJ Web Conf. – 2013. – V. 40, 12004.
6. Joseph R. I., Schlömann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies //Journal of Applied Physics. – 1965. – Т. 36. – №. 5. – С. 1579-1593.