

**В.В. Витько<sup>1,2</sup>, А.И. Дедык<sup>1</sup>, А.В. Кондрашов<sup>1,2</sup>,  
А.А. Никитин<sup>1,2</sup>, Б.А. Калинин<sup>1</sup>, Дж.Э. Батлер<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)

## **Датчик ультрафиолетового излучения на основе слоистой структуры феррит-алмаз**

*Представлена конструкция датчика ультрафиолетового излучения на основе слоистого резонатора железо-иттриевый гранат / алмаз. В основе принципа действия датчика лежит изменение закона дисперсии спиновых волн, а, следовательно, частоты и добротности собственных мод исследуемого резонатора при появлении свободных носителей заряда, генерируемых ультрафиолетовым излучением.*

**Ключевые слова:** ультрафиолетовое излучение, феррит, алмаз

Одним из способов увеличения разрешающей способности процесса фотолитографии является использование глубокого ультрафиолетового излучения (УФЛ) с длиной волны от 157 нм до 248 нм [1]. Улучшение характеристик быстрых и чувствительных датчиков глубокого УФЛ позволит расширить возможность освоения данного диапазона длин волн.

Одним из способов создания датчика глубокого ультрафиолетового излучения является использование материала с шириной запрещенной зоны, сравнимой с энергией кванта УФЛ излучения. Одним из таких материалов является монокристаллический алмаз, ширина запрещенной зоны которого составляет около 5,5 эВ. Последние достижения в технологии получения монокристаллических пленок и слоев алмаза с различным уровнем легирования открывают перспективы для их применения в качестве датчиков излучения с длиной волны менее 250 нм. Так, в работах [2-5] предложены датчики излучения, состоящие из монокристаллического алмаза с металлическими электродами.

В данной работе нами предложена значительно более простая конструкция датчика УФЛ, построенная на основе слоистой структуры железо-иттриевый гранат/алмаз. В основе принципа действия СВЧ устройств на намагниченных до насыщения монокристаллических пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) лежат особенности распространения в них особого вида волн – волн намагниченности или длинноволновых спиновых волн [6]. В основе принципа действия

предлагаемой конструкции датчика УФЛ лежит влияние свободных носителей заряда, генерируемых в полупроводнике, на закон дисперсии спиновых волн (СВ) в пленке ЖИГ.

Влияние проводящих экранов на дисперсионные характеристики спиновых волн исследованы достаточно подробно. В частности, в работе [7] выведено дисперсионное уравнение для поверхностной спиновой волны в пленке с металлическим экраном. Схематически исследованная структура показана на рисунке 1(а). В работе [7] не учитывалась конечность проводимости металла, а исследовалась зависимость СВЧ параметров системы в зависимости от расстояния до экрана. Так, в работе показано, что для описываемой структуры дисперсионное уравнение имеет вид:

$$\left(1 + 2 \frac{\omega_H}{\omega_M} + 2s \frac{\omega}{\omega_M}\right) \frac{\omega_M + (\omega_H - s\omega)(1 + \tanh(kt))}{\omega_M + (\omega_H + s\omega)(1 - \tanh(kt))} = e^{-2kd}, \quad (1)$$

где  $d$  – толщина пленки,  $t$  – расстояние до металла,  $s$  – параметр, характеризующий направление распространения поверхностной спиновой волны. На рисунке 1(б) показаны дисперсионные характеристики, рассчитанные по формуле (1) при различных значениях расстояния до металла. Из рисунков можно видеть, что при приближении проводящего экрана дисперсия СВ значительно изменяется. В частности при малых значениях  $k$  резко возрастает значение частоты.

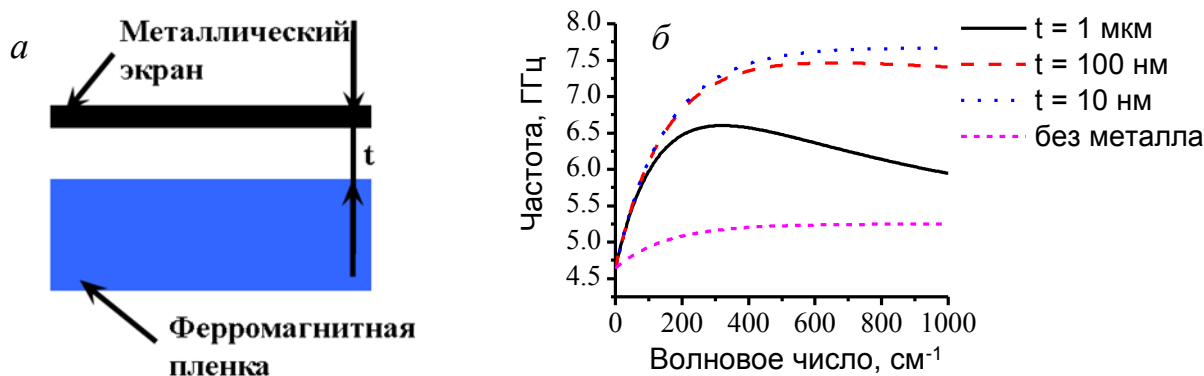


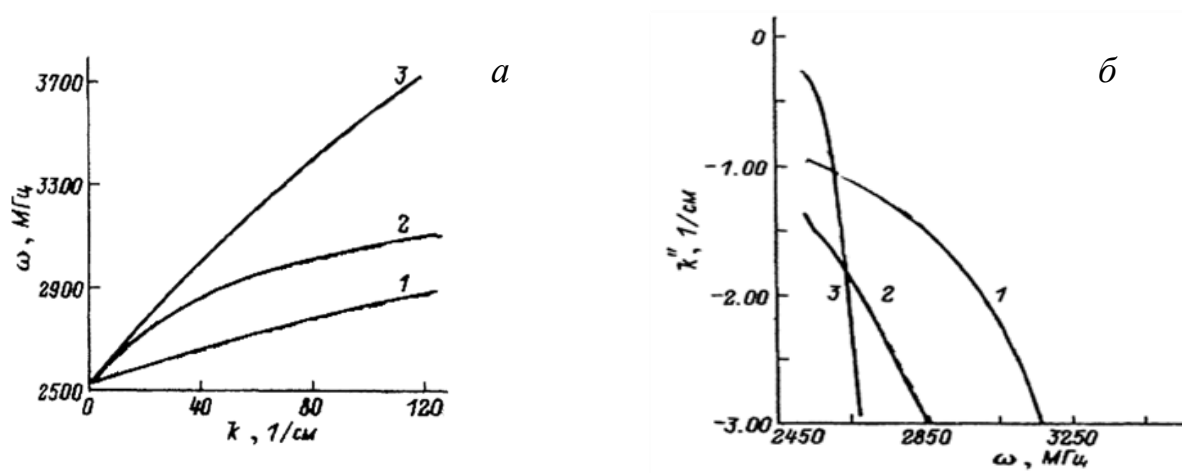
Рисунок 1(а). Структура экранированной пленки, (б) дисперсионные характеристики для различных расстояний между пленкой и металлом

Расчет дисперсии и параметров диссипации спиновых волн в структурах феррит-полупроводник с учетом конечного значения проводимости был выполнен в работе [8]. В этой работе в рамках гидродинамической модели для феррита и полупроводника в магнитоэлектронном приближении без учета обменного взаимодействия было получено дисперсионное уравнение поверхностных спиновых волн, распространяющихся в планарном феррит-полупроводниковом волноводе. Полученное дисперсионное уравнение выглядит следующим образом:

$$e^{-2kd} = \frac{(\mu^- + k)(\delta\mu^+ + k) \tanh(k_s t) + (\mu^+ + k)\sqrt{\delta}}{(\mu^+ - k)(\delta\mu^- - k) \tanh(k_s t) + (\mu^- - k)\sqrt{\delta}}, \quad (2)$$

где  $\mu^\pm = k(\mu \pm \mu_a)$ ,  $k_s^2 = \delta k^2$ ,  $k = k_1 + ik_2$ ,  $d$  и  $t$  – толщины соответственно ферритового и полупроводникового слоев,  $\mu$  и  $\mu_a$  – диагональный и недиагональный элементы тензора магнитной проницаемости феррита. Величина  $\delta$  определяет особенности взаимодействия спиновой волны с полупроводниковым слоем. При этом  $\delta = f(\omega)$ . Таким образом, полученное в работе [7] выражение позволяет промоделировать как дисперсионные характеристики, так и изменение параметра диссипации СВ для разных пластин полупроводника. В случае, когда  $\delta = 1$ , уравнение (2) переходит в уравнение Деймона-Эшбаха [9]. На рисунке 2(a) показаны графики дисперсионных зависимостей поверхностных спиновых волн для различных значений концентрации носителей заряда. Из рисунка можно видеть, что дисперсия спиновых волн изменяется под действием концентрации носителей заряда в полупроводнике, начиная с концентрации  $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . С увеличением  $N$  кривые смещаются в сторону кривой, соответствующей металлизированной пленке. Следует отметить, что вследствие конечного значения проводимости полупроводниковой пленки, ее влияние эквивалентно действию металлического слоя отнесенного на конечное расстояние. Этот эффект может быть объяснен наличием у проводящей пленки скин-слоя.

На рисунке 2(б) показаны расчетные зависимости потерь, возникающих в структуре феррит-полупроводник, при различных значениях концентрации носителей заряда в полупроводнике. Из рисунка видно, что с увеличением  $N$  происходит уменьшение потерь в области больших волновых чисел спиновых волн.



$$1 - N = 10^{13}, \quad 2 - N = 10^{15}, \quad 3 - N = 10^{17}$$

Рисунок 2. Графики зависимости СВЧ параметров структур феррит-полупроводник при различных значениях концентрации носителей заряда в полупроводнике. (а) – дисперсионная характеристика, (б) – зависимость потерь от частоты [8].

Физически ясно, что измерение дисперсии и параметров диссипации спиновых волн в структурах феррит-полупроводник позволяет оценить параметры полупроводниковых структур, таких как проводимость и расстояние до области легирования. Измерения резонансных характеристик резонатора на слоистой структуре ЖИГ/алмаз позволит получить информацию о концентрации свободных носителей и, следовательно, об интенсивности излучения.

На рисунке 3 представлена схема экспериментальной установки, позволяющей экспериментально изучить детектор УФЛ. Для создания детектора была использована слоистая структура ЖИГ/алмаз. Пленка ЖИГ была выращена на подложке галлий-гадолиниевый граната методом жидкофазной эпитаксии. Толщина пленки ЖИГ составляла 6 мкм. Из этой пленки был вырезан пленочный резонатор с размерами в плоскости  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . Сверху на резонатор был прикреплен

образец монокристаллической пленки алмаза размером 3.5x3.5 мм<sup>2</sup>. Описанная структура помещалась в постоянное магнитное поле, направленное по касательной к плоскости пленок. Напряженность поля выбиралась такой, чтобы ЖИГ-резонатор был намагничена до насыщения.



Рисунок 3. Блок-схема датчика УФЛ на основе структуры алмаз/ЖИГ

С помощью микрополосковой антенны в слоистом резонаторе возбуждались колебания намагниченности. Частота резонансных мод определялась характеристиками структур, из которых был изготовлен резонатор. Следует напомнить, что концентрация носителей заряда в пленке алмаза будет влиять на частоту и добротность резонансных пиков.

Для оценки этого эффекта необходимо рассчитать резонансные частоты резонатора ЖИГ/алмаз, считая алмаз диэлектриком. Эти частоты будут определяться дисперсией спиновых волн в касательно намагниченной пленке, размерами резонатора ( $w$  - ширина,  $l$  - длина). Связь между частотой можно определить с помощью дисперсионного уравнения вида  $f_{res} = D(k_{res})$ , где

$k_{res} = \sqrt{(k_{\parallel})^2 + (k_{\perp})^2}$  - резонансное волновое число,  $k_{\parallel} = \frac{\pi m}{w}$ ,  $k_{\perp} = \frac{\pi n}{w}$  - продольное и поперечное волновые числа,  $m$  и  $n$  - номера, определяющие распределения магнитостатического потенциала вдоль и поперек направления намагничивания.

Для описанного выше резонатора  $w=3$  мм,  $l=3$  мм. В ходе моделирования была рассчитана дисперсионная характеристика касательно намагниченной слоистой структуры. Результаты моделирования представлены на рисунке 4(a). Выбирая значения  $m$  и  $n$ , можно определить значения соответствующих резонансных частот.

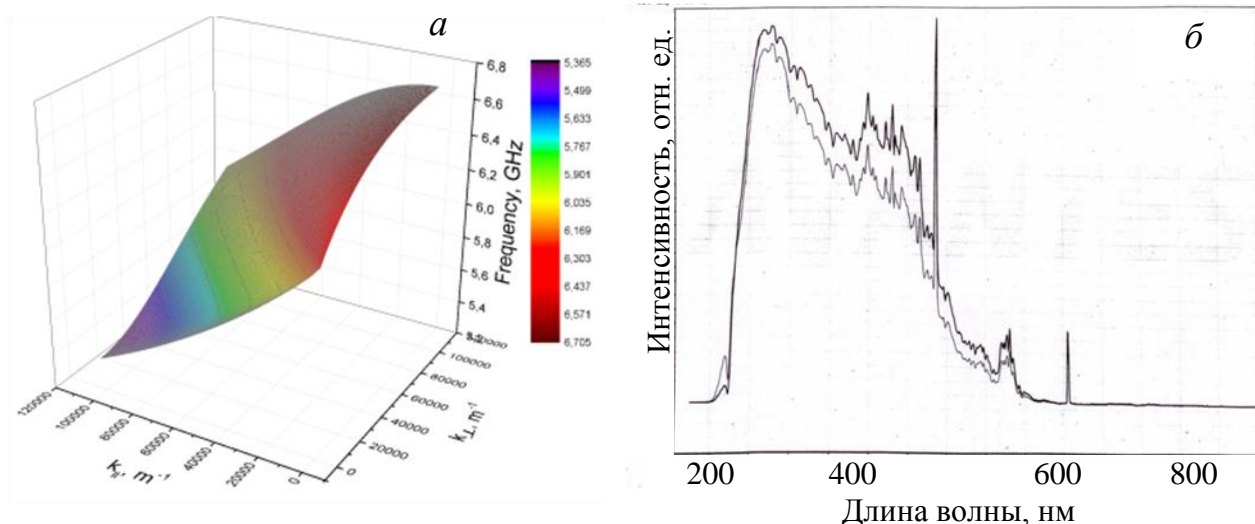


Рисунок 4 (а). Дисперсионная характеристика спиновой волны в касательно намагниченной пленке ЖИГ; (б) – зависимость интенсивности отраженной волны от длины волны для случаев только зеркала (светлая линия), и случая зеркала с алмазом (темная линия)

На втором этапе исследования были проведены измерения оптических свойств монокристаллического алмаза. В ходе исследования экспериментальный образец помещался на зеркало. Система зеркало-образец облучалась излучением в широком диапазоне длин волн (200-600 нм). При этом измерялась отраженная мощность.

На рисунке 4(б) показана зависимость отраженной мощности от длины волны для двух случаев. Светлая линия характеризует отражение только от зеркала, а темная линия – от зеркала с алмазом. Из рисунка видно, что практически во всем диапазоне длин волн алмаз позволяет снизить уровень отраженного сигнала. Однако в диапазоне 200-230 нм светлая кривая проходит выше темной. Это может быть объяснено поглощением излучения за счет переноса электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Измерения поглощения проводилось для двух образцов. На рисунке 5 представлены нормированные графики коэффициента отражения. Эти графики получены путем вычитания из уровня, соответствующего отражению от зеркала, уровня, соответствующего отражению от зеркала с алмазом. Рисунок 5(а) соответствует случаю использования алмаза с низким содержанием примесей. На рисунке 5(б) показана аналогичная зависимость для образца алмаза с высокой

концентрацией примеси азота. Наличие такой примеси приводило к появлению желтого оттенка.

Как видно из графиков рисунка 5(а), максимум поглощения соответствует длине волны 220 нм, что отвечает ширине запрещенной зоны 5.64 эВ. Эта величина хорошо согласуется со справочными данными, что говорит о высокой степени чистоты образца пленки алмаза, а также о возможности дальнейшего использования такой пленки в качестве проводящего слоя в структуре УФЛ.

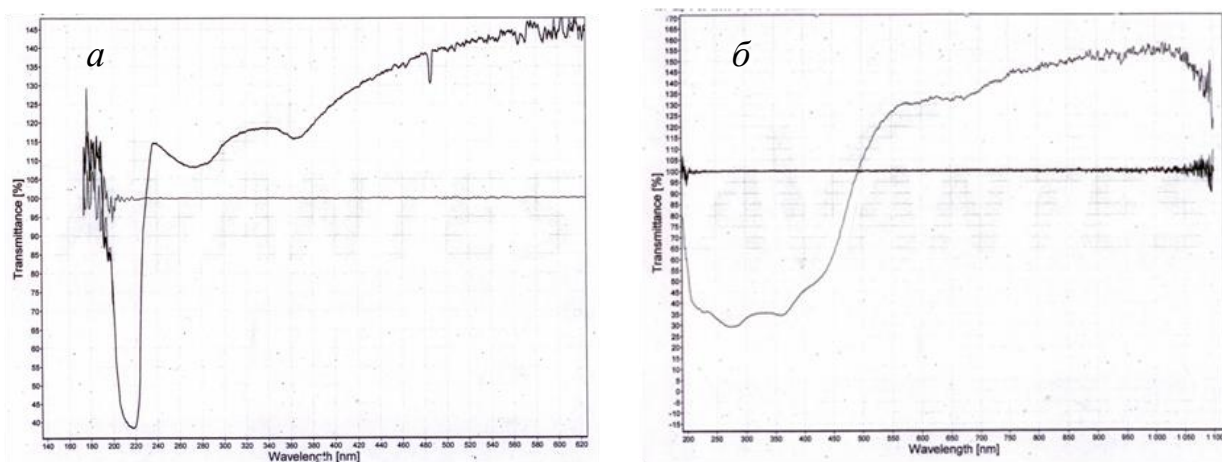


Рисунок 5. Нормированный уровень отражения для (а) «чистого» образца алмаза, (б) примесного образца алмаза

На рисунке 5(б) показана характеристика «желтого» примесного алмаза. Поглощение начинается при 450-500 нм. Это подтверждает предположение о существовании азотной примеси, в результате чего в запрещенной зоне алмаза появляются дополнительные примесные подуровни. Электроны в зону проводимости переходят с этих дополнительных уровней при меньшей энергии по сравнению с чистым алмазом.

Таким образом, в данной работе представлена конструкция датчика УФЛ, построенного на основе СВЧ резонатора ЖИГ/алмаз. Достоинствами предложенной конструкции является простота реализации, быстродействие и высокая чувствительность. Экспериментальные характеристики будут представлены позднее.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке в рамках гранта Правительства Российской Федерации по Постановлению № 220 (Договор № 14.В25.31.0021 от 26 июня 2013 г).

Библиографический список

1. Gwyn C. W. et al. Extreme ultraviolet lithography //Journal of Vacuum Science & Technology B. – 1998. – Т. 16. – №. 6. – С. 3142-3149.
2. Kania D. R. et al. Diamond radiation detectors //Diamond and Related Materials. – 1993. – Т. 2. – №. 5. – С. 1012-1019.
3. Prasad R. R. Diamond Radiation Detectors //Alameda Applied Science Corporation. – 2006.
4. Kagan H. Diamond radiation detectors may be forever! //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2005. – Т. 546. – №. 1. – С. 222-227.
5. Teraji T. et al. Highly sensitive UV photodetectors fabricated using high-quality single-crystalline CVD diamond films //Diamond and related materials. – 2004. – Т. 13. – №. 4. – С. 858-862.
6. Гуревич, А. Г. Магнитные колебания и волны [Текст] / А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков// М.: Физматлит, 1994. 464 с
7. W.L. Bongianni // J. Appl. Phys, Vol.43, P.2541-2548 (1972).
8. А.С. Киндяк // ЖТФ, Т.64, Вып.11, С. 99-104 (1994)
9. R.W. Damon, J.R. Eschbach. J. Phys. Chem. Sol. 19, 308 (1961).