

МАХАСИН АЛИ АБДЕЛРХМАН ФРАХ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ НЕГО

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной  
аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре нанотехнологии и микросистемной техники инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель: **Беляев Виктор Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник управления развития науки, Государственный университет просвещения; профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерной академии, РУДН

Официальные оппоненты: **Гудков Александр Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры технологий приборостроения, ФГАОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

**Нуриев Александр Вадимович**  
кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника управления средств отображения информации АО НПП Циклон

**Каманина Наталия Владимировна**  
доктор физико-математических наук, начальник отдела «Фотофизика сред с нанообъектами» АО «ГОИ им. С.И. Вавилова», начальник отдела «Фотофизика наноструктурированных материалов и устройств» АО НПО ГОИ

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_\_:\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета ПДС 2022.013 при в ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы». по адресу : 115093, г. Москва, Подольское шоссе д. 8, корп.5, аудитория 3036 .

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Электронная версия автореферата и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте РУДН <https://www.rudn.ru/science/dissovet> и на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ <https://vak.gisnauka.ru/>.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ПДС 2022.013

Агасиева С.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время в связи со значительным расширением количества и ассортимента различных типов радиоэлектронных устройств, повышения мощности излучения и расширения частотного диапазона постоянно остается актуальность проблемы воздействия этого излучения на другие электронные устройства и, в особенности, на человека, находящегося в пространстве, заполненном этим излучением.

Эта проблемы включает в себя количественные измерения электромагнитного излучения (ЭМИ) от различных приборов в различных частотных диапазонах, сравнения с уровнем допустимого излучения, предписываемым в нормативных документах по охране труда и здоровья, разработку и совершенствование методов измерения ЭМИ в различных условиях эксплуатации, а также разработку методов ослабления ЭМИ.

### **Цель работы.**

Целью работы является исследование уровня электромагнитного излучения с учетом зон, где одновременно работают несколько элементов радиоэлектронной аппаратуры, и разработка технологии материалов фильтров для защиты от электромагнитного излучения.

### **Задачи работы:**

- Разработка методики измерения уровня электромагнитного загрязнения от множества элементов радиоэлектронной аппаратуры
- Измерение уровня электромагнитного загрязнения от разных элементов РЭА, работающих в диапазоне 1 МГц – 1 ТГц
- Разработка модели прогнозирования и оценки электромагнитного излучения от различных источников радиоэлектронных приборов
- Разработка технологии материалов фильтров для защиты от электромагнитного излучения

### **Научная новизна** заключается в следующем:

- Разработанная методика измерения уровня электромагнитного загрязнения используется в более широком пространстве около оператора для большего

количества источников ЭМЗ и, соответственно, большего количества возможных комбинаций этих источников, а также большего количества параметров электромагнитного излучения.

- Впервые протестированы пятнадцать сценариев трех параметров электромагнитного излучения от четырех различных источников радиоэлектронных приборов и комбинаций из двух, трех и четырех приборов.
- Разработанная и экспериментально верифицирована модель прогнозирования и оценки электромагнитного излучения от различных источников радиоэлектронных приборов их комбинаций обеспечивает согласие расчетных и экспериментальных данных. Расхождение расчетного и экспериментальных значений напряженности электрического поля ЭМИ варьируется от 1 до 9%, напряженности магнитного поля от 6 до 17%, мощности излучения от 0,2 до 25% для сложных комбинаций источников излучения.
- Впервые разработаны материалы фильтров для защиты от электромагнитного излучения на основе нескольких технологий - стекла с имплантированными наночастицами переходных металлов, металло-пластиковой фольги, стекол с различными видами покрытий из окиси индия и олова (ИТО), многослойных периодических структур (сверхрешеток) с высокой структурной разупорядоченностью на основе повторяющихся систем  $\text{ZnO}/\text{ZnO:Al}$ .

#### **Методология и методы исследования.**

Измерение параметров электромагнитного излучения. Уравнение Био-Савара. Технологии стекла с имплантированными наночастицами переходных металлов, металло-пластиковой фольги, стекол с различными видами покрытий из окиси индия и олова (ИТО). Технология магнетронного распыления. Методы рентгеновской дифракции, растровой электронной микроскопии, оптической спектроскопии для исследования структур и свойств покрытий для защиты от электромагнитного излучения.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика измерения параметров электромагнитного излучения для произвольного количества радиочастотных источников ЭМЗ и их возможных комбинаций в пространстве около оператора.

2. Модель прогнозирования и оценки электромагнитного излучения от различных источников радиоэлектронных приборов и их комбинаций.

3. Технологии материалов фильтров для защиты от электромагнитного излучения на основе стекла с имплантированными наночастицами переходных металлов, металло-пластиковой фольги, стекол с различными видами покрытий из окиси индия и олова (ИТО), многослойных периодических структур (сверхрешеток) ZnO/ZnO:Al.

#### **Практическая значимость.**

- Оригинальная методика измерения уровня электромагнитного загрязнения может быть использована для измерения не менее трех параметров электромагнитного излучения от произвольного количества элементов радиоэлектронной аппаратуры и их различных комбинаций.
- Модель электромагнитного излучения от различных источников радиоэлектронных приборов может быть использована для прогнозирования и оценки уровня создаваемого ими электромагнитного загрязнения при произвольном количестве источников и для предотвращения превышения уровня допустимого облучения оператора.
- Покрытия из разработанных и исследованных материалов обеспечивают существенное уменьшение параметров электромагнитного излучения (от 15 до 98%). Предложены рекомендации для практического применения для защиты от электромагнитного излучения различных радиоэлектронных приборов. При этом многие из этих материалов сохраняют свои функциональные свойства, в частности, оптическую прозрачность.
- Результаты диссертационной работы используются в практической работе ООО «НТК МГТУ им. Н.Э. Баумана» с целью разработки фильтров для защиты от электромагнитного излучения различных радиочастотных приборов, работающих в частотных диапазонах от 1 МГц до 100 ГГц.

#### **Степень достоверности.**

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартных экспериментальных методов измерения параметров

электромагнитного излучения, применением апробированных и теоретически обоснованных методов, систематическим тестированием разработанных моделей, результатами других авторов.

**Роль автора диссертации. Личный вклад.**

Работа содержит результаты исследований, проводимых автором в период с 2014 г. Все они были получены при непосредственном участии автора либо им лично. Автор непосредственно проводил выбор направлений исследований и методов их реализации. Автору принадлежит основная роль в анализе и интерпретации результатов, формулировке выводов. Все результаты исследований получены и опубликованы при определяющем участии автора.

**Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались на научных мероприятиях:

- Конференция «Инженерные системы», Инженерная академия РУДН, 4-5 марта 2019 г.
- Международная научная конференция молодых ученых МГОУ «Наука на благо человечества», 17-18 апреля 2019 г.
- Международная конференция «Перспективная элементная база микро- и наноэлектроники с использованием современных достижений теоретической физики», МГОУ, Москва, 20 – 23 апреля 2021 г.

**Публикации.** Полнота изложения материалов диссертации обеспечена их публикацией в рецензируемых научных журналах, в том числе публикацией за последние 5 лет трех статей в изданиях, рецензируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования, и двух статей в изданиях из Перечня ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы. Объем диссертации составляет 122 страницы основного текста, содержащего 20 таблиц и 33 рисунка, список литературы содержит 92 работы отечественных и зарубежных авторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** приведен обзор научной литературы по теме диссертации. Представлены основные понятия и термины по электромагнитному излучению (ЭМИ) и электромагнитному загрязнению, показана актуальность работы с точки зрения защиты радиоэлектронной аппаратуры и организма оператора, приведены характеристики излучения от различных приборов, представлены современные модели и методы параметров ЭМ облучения. Особое внимание уделено современным технологиям материалов для защиты от ЭМЗ. В целом обоснована актуальность работы, ее цель и задачи, методы исследования.

**Глава 2 «Методы исследования»** содержит описание методики измерения трех основных параметров ЭМЗ - напряженность магнитного поля (мА/м), напряженность электрического поля (В/м) и плотность мощности (мВт/м<sup>2</sup>). Наша методика является развитием метода, описанного Д. Бродичем в [(Измерение чрезвычайно низкочастотного магнитного поля в окрестности ноутбука)]. Эксперимент Бродича включал в себя измерения магнитного поля в 27 точках по соседству с ноутбуком, разделенных на три группы. Недостатками его метода являются отсутствие исследования влияния излучения других источников, кроме ноутбука, оценка электромагнитного загрязнения только для магнитного поля в микротеслах (μТ) и отсутствие данных по другим составляющим, выполнение экспериментов только в области экрана и клавиатуры и только перед ноутбуком, без оценки уровня ЭМЗ в области вокруг ноутбука.

В нашей работе эксперимент выполнялся в следующей последовательности. Во время эксперимента ноутбук (портативный компьютер Lenovo ideapad 100-15IBD с процессором Intel ® core (TM) i3-5005u) изначально работал в штатном режиме. Затем он подключался к сети Wi-Fi с частотой 2300 МГц для проведения второго набора измерений. Был задействован мобильный телефон Huawei Y7 Prime 2018, работающий на частотах 1,4 ГГц + 1,1 ГГц и 1800 МГц. Наконец, была

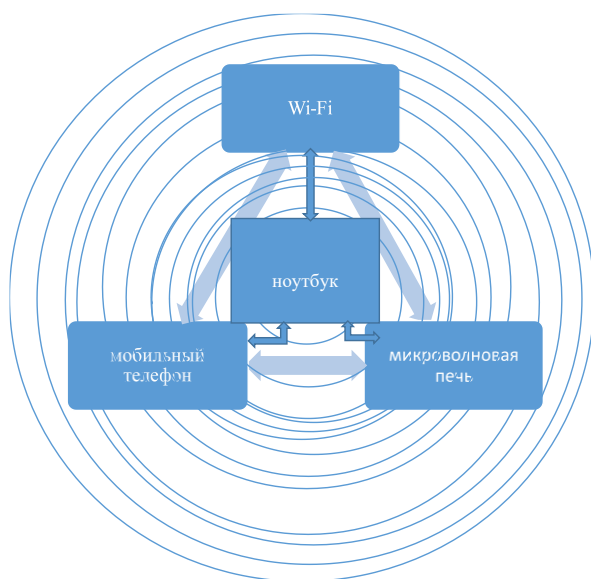
добавлена микроволновая печь, работающая на частоте 2450 МГц. Приборы одновременно могут измерять максимальное, среднее и минимальное значения параметров ЭМИ для каждой исследуемой комбинации. Измерения всех трех параметров выполнялись в 45 точках над ноутбуком, перед ним и по разные стороны от него.

Для измерений использовались трехкоординатный измеритель напряженности радиочастотного поля TM-195 от TENMARS TEST & MEASUREMENT INSTRUMENTS и измеритель ЭДС EMF 829 для измерения напряженности низкочастотного электромагнитного поля, обеспечивающие точность определения основных параметров до 0,1 мВ/м, 0,1 мкА/м, 0,001 мкВт/м<sup>2</sup>.

### Глава 3 «Электромагнитное загрязнение от множества источников».

Разработана модель для численной оценки электромагнитного загрязнения, вызванного множеством источников, и выполнен комплекс соответствующих измерений. На рис. 1 модель А изображает несколько РЧ источников, работающих одновременно в одном и том же месте около ноутбука, что приводит к электромагнитному загрязнению от различных источников. Затем в модели В представлена методология сравнения трех параметров электромагнитного загрязнения (ЭМИ) с использованием одного, двух, трех и четырех источников.

А



В

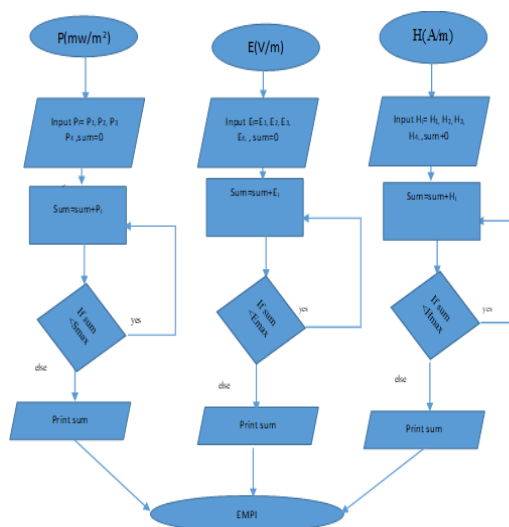




Рис. 1. Модель электромагнитного загрязнения. Слева – модель А. Множество источников РЧ излучения одновременно работают на одной и той же площади, приводя к сложному характеру ЭМЗ. Справа – модель В. Алгоритм модель сбора разных параметров ЭМИ нескольких РЧ источников, работающих одновременно в одном и том же месте около ноутбука.

В математической модели интенсивности электромагнитного загрязнения ЕМРІ (ЭМЗ) около различных радиоэлектронных приборов с использованием модели в публикации [S. Malathi, et al., IJERT V. 2 No. 12, p.162-166 (2013)] рассчитывается площадь ноутбука в зоне загрязнения и значение ЕМРІ в Ватт-часах из уравнения:

$$EMPI = \left( \frac{\sum ai}{A} \right) \sum \int_0^T Pi(t) dt \dots \dots \dots (1)$$

где А - область ячейки (пространства или площади около приборов),  $ai$  - площадь пакета загрязнения POP (packet of pollution) от каждого источника-излучателя,  $Pi$  - измеряемая мощность, Т период времени, например, 24 часа. В результате преобразований получаем

$$EMPI = \left( \frac{\sum ai}{A} \right) = \sum \int_0^T P_{min} R^2_{max} \left( \frac{4\pi}{\lambda^2} \right) dt \dots \dots \dots (2)$$

для суммы всех источников-излучателей в единичной ячейке пространства. Для суммирования всех источников-излучателей определим пакет загрязнения POP (packet of pollution):

$$EMPI = \left( \frac{\text{сумма всех POP}}{\text{Площадь ячейки}} \right) \dots \dots \dots (3)$$

Эта модель применена для оценки ЭМИ от различных источников ЭМЗ и их комбинаций.

В табл.1 в первом столбце приведены источники ЭМИ (их характеристики и спецификации в разделе «Методология») и 11 различных комбинаций двух, трех и четырех исследованных приборов, всего 15 конфигураций измерения. Цифрой 1, 2, 3 или 4 обозначены первичные приборы (мобильный телефон, ноутбук, Wi-Fi роутер, микроволновая печь, соответственно. Далее приведены вертикальные столбцы с результатами измерений (см. раздел «Методология») или расчетов согласно приведенной выше модели по трем исследованным параметрам:

напряженность электрического поля (В/м), напряженность магнитного поля (А/м), мощность излучения (Вт/м<sup>2</sup>). Для каждой пары экспериментального и рассчитанного значения указано расхождение этих величин в процентах. Параметры ЭМЗ от различных комбинаций приборов рассчитаны по формулам в нижней строке таблицы 1.

Данные табл.1 свидетельствуют о справедливости предложенной модели, дающей расчетные значения для разных источников и их комбинаций весьма близкие к экспериментальным. Расхождение расчетного и экспериментальных значений напряженности электрического поля ЭМИ варьируется от 1 до 9%, напряженности магнитного поля от 6 до 17%, мощности излучения от 0,2 до 25% для сложных комбинаций источников излучения.

В Таблице 2 приведены измеренные и рассчитанные значения плотности излученной мощности для электромагнитного загрязнения от нескольких источников. Источники 1-4 расставлены в порядке убывания мощности ЭМИ. В столбце 7 приводится их сравнение с электромагнитным загрязнением от одного источника и указываются некоторые особые случаи, имеющие практическое значение для защиты РЭА или оператора. В целом Табл.2 дает сравнение всех возможных случаев ЭМЗ, исследованных в работе, по мощности ЭМИ.

| Источники            | $E_m$ , (В/м)<br>(измеренный) | $E_c$ , (В/м)<br>(рассчитанный) | Расхождение<br>$(V_m - V_c)/V_m$ | $H_m$ , А/м<br>(измеренный) | $H_c$ , А/м<br>(рассчитанный) | Расхождение<br>$(H_m - H_c)/H_m$ | $P_m = E_m * H_m$<br>Вт/м <sup>2</sup> | $P_c = E_c * V_c$<br>Вт/м <sup>2</sup> | Расхождение<br>$(P_m - P_c)/P_m$ |
|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| 1 моб. тел.          | 6.698                         | 6.698                           | 0.00                             | 17.77                       | 17.77                         | 0.00                             | 119.03                                 | 119.02                                 | 0.00                             |
| 2 ноутбук            | 2.846                         | 2.846                           | 0.00                             | 7.397                       | 7.397                         | 0.00                             | 21.05                                  | 26.68                                  | 0.00                             |
| 3 Wi-Fi              | 1.335                         | 1.335                           | 0.00                             | 2.071                       | 2.071                         | 0.00                             | 2.765                                  | 2.765                                  | 0.00                             |
| 4 микроволн.<br>печь | 27.03                         | 27.03                           | 0.00                             | 72.68                       | 72.68                         | 0.00                             | 1.965                                  | 1.964                                  | 0.00                             |
| 5 = (1,3)            | 6.78                          | 6.83                            | 0.037                            | 17.99                       | 17.89                         | 0.00                             | 121.97                                 | 122.189                                | 0.002                            |
| 6= (2,3)             | 1.534                         | 1.511                           | 0.015                            | 4.069                       | 4.04                          | 0.00                             | 6.24                                   | 6.10                                   | 0.022                            |
| 7= (3,4)             | 25.666                        | 27.06                           | 0.054                            | 68.376                      | 72.71                         | 0.06                             | 1.76                                   | 1.968                                  | 0.12                             |
| 8= (1,2)             | 3.51                          | 3.852                           | 0.0966                           | 9.31                        | 10.37                         | 0.11                             | 32.68                                  | 39.95                                  | 0.22                             |
| 9=(2,4)              | 26.86                         | 27.179                          | 0.019                            | 67.92                       | 73.06                         | 0.08                             | 1.88                                   | 1.986                                  | 0.056                            |
| 10= (1,4)            | 32.07                         | 27.85                           | 0.13                             | 68.15                       | 74.82                         | 0.09                             | 1.802                                  | 2.08                                   | 0.015                            |
| 11= (1,2,3)          | 5.534                         | 5.187                           | 0.06                             | 14.996                      | 12.44                         | 0.17                             | 82.98                                  | 5.187                                  | 0.22                             |
| 12= (1,2,4)          | 25.67                         | 27.99                           | 0.090                            | 68.1                        | 75.19                         | 0.10                             | 1.75                                   | 2.11                                   | 0.21                             |
| 14= (1,3,4)          | 25.962                        | 27.88                           | 0.074                            | 68.87                       | 74.85                         | 0.09                             | 1.79                                   | 2.087                                  | 0.17                             |
| 15= (1,2,3,4)        | 25.658                        | 28.02                           | 0.092                            | 69.184                      | 75.21                         | 0.09                             | 1.652                                  | 2.107                                  | 0.27                             |
|                      | вычисленный                   | $E = \sqrt{\sum \pm E_i^2}$     |                                  | вычисленный                 | $H = \sqrt{\sum \pm H_i^2}$   |                                  |                                        |                                        |                                  |

Табл.1. Источники ЭМИ и 11 различных комбинаций двух, трех и четырех исследованных приборов (первый столбец). Первичные приборы: мобильный телефон (1), ноутбук (2), Wi-Fi роутер (3), микроволновая печь (4). В вертикальных столбцах приведены результатами измерений или расчетов по трем исследованным параметрам: напряженность электрического поля  $E$ , напряженность магнитного поля  $H$ , мощность излучения  $P$ . Для каждой пары экспериментального и рассчитанного значения указано относительное расхождение этих величин.

Таблица 2. Измеренные и рассчитанные значения плотности излученной мощности для электромагнитного загрязнения от нескольких источников и их сравнение с ЭМЗ в случае одного источника или их комбинаций (столбец 7).

| случай             | Источник (Вт/м <sup>2</sup> ) | Измеренные значения |        |        | Сравнение     | Примечания                   |
|--------------------|-------------------------------|---------------------|--------|--------|---------------|------------------------------|
|                    |                               | макс.               | ср.    | мин.   |               |                              |
| <b>1</b>           | <b>(1) мобильный телефон</b>  | 117.56              | 39.232 | 11.756 | Случай 1 с 5  | $P_1 < P_5$                  |
|                    | 115.027 (макс) 3.993          | 29.92               | 4.115  | 0.184  | Случай 1 с 8  | $P_1 > P_8$ , кроме ср.      |
|                    | (ср) 1.253 (мин)              | 1.617               | 0.879  | 0.524  | Случай 1 с 10 | $P_1 > P_{10}$               |
|                    | Здесь и далее первое          | 81.71               | 12.233 | 2.138  | Случай 1 с 11 | $P_1 < P_{11}$ , кроме макс. |
|                    | число относится к             | 1.654               | 0.493  | 0.257  | Случай 1 с 12 | $P_1 > P_{12}$ ,             |
|                    | максимальной                  | 1.637               | 0.635  | 0.200  | Случай 1 с 14 | $P_1 > P_{14}$               |
|                    | измеренной                    | 1.528               | 0.483  |        | Случай 1 с 15 | $P_1 > P_{15}$               |
|                    | мощности                      |                     |        | 0.213  |               |                              |
|                    | излучения, второе –           |                     |        |        |               |                              |
|                    | к средней, третье – к         |                     |        |        |               |                              |
|                    | минимальной                   |                     |        |        |               |                              |
|                    | мощности                      |                     |        |        |               |                              |
| <b>2</b>           | <b>(2) ноутбук</b>            | 5.998               | 0.783  | 0.572  | Случай 2 с 6  | $P_2 > P_6$ , кроме мин.     |
|                    | 20.002 4.379                  | 29.92               | 4.115  | 0.184  | Случай 2 с 8  | $P_2 > P_8$ , кроме макс     |
|                    | 0.220                         | 1.783               | 0.500  | 0.251  | Случай 2 с 9  | $P_2 > P_9$ , кроме мин      |
|                    |                               | 81.71               | 12.233 | 2.138  | Случай 2 с 11 | $P_2 < P_{11}$               |
|                    |                               | 1.654               | 0.493  | 0.257  | Случай 2 с 12 | $P_2 > P_{12}$ , кроме мин   |
|                    |                               | 1.587               | 0.495  | 0.260  | Случай 2 с 13 | $P_2 > P_{13}$ , кроме мин   |
|                    |                               | 1.528               | 0.483  | 0.213  | Случай 2 с 15 | $P_2 > P_{15}$               |
| <b>3</b>           | <b>(3) Wi-Fi</b>              | 117.56              | 39.232 | 11.756 | Случай 3 с 5  | $P_3 < P_5$                  |
|                    | 2.869 1.237 0.126             | 5.998               | 0.783  | 0.572  | Случай 3 с 6  | $P_3 < P_6$ , кроме ср.      |
|                    |                               | 1.659               | 0.728  | 0.429  | Случай 3 с 7  | $P_3 > P_7$ , кроме мин      |
|                    |                               | 81.71               | 12.233 | 2.138  | Случай 3 с 11 | $P_3 < P_{11}$               |
|                    |                               | 1.587               | 0.495  | 0.260  | Случай 3 с 13 | $P_3 > P_{13}$ , кроме мин   |
|                    |                               | 1.637               | 0.635  | 0.200  | Случай 3 с 14 | $P_3 > P_{14}$ , кроме мин   |
|                    |                               | 1.528               | 0.483  | 0.213  | Случай 3 с 15 | $P_3 > P_{15}$ , кроме мин   |
| <b>4</b>           | <b>(4) микроволновая печь</b> | 1.639               | 0.728  | 0.429  | Случай 4 с 7  | $P_4 < P_7$ , кроме макс     |
|                    | 1.963 0.683                   | 0.963               | 0.500  | 0.251  | Случай 4 с 9  | $P_4 > P_9$ , кроме мин      |
|                    | 0.211                         | 1.617               | 0.879  | 0.524  | Случай 4 с 10 | $P_4 < P_{10}$ , кроме макс  |
|                    |                               | 0.922               | 0.493  | 0.257  | Случай 4 с 12 | $P_4 > P_{12}$ , кроме мин   |
|                    |                               | 0.896               | 0.495  | 0.260  | Случай 4 с 13 | $P_4 > P_{13}$ кроме мин     |
|                    |                               | 1.118               | 0.635  | 0.200  | Случай 4 с 14 | $P_4 > P_{14}$               |
|                    |                               | 1.528               | 0.483  | 0.213  | Случай 4 с 15 | $P_4 > P_{15}$ , кроме мин   |
| Продолжение Табл.2 |                               |                     |        |        |               |                              |

|           |                    |              |              |              |               |                                |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------------|
| <b>5</b>  | <b>(1+3)</b>       | 68.706       | 12.233       | 2.138        | Случай 5 с 11 | $P_5 > P_{11}$                 |
|           | 117.56 39.272      | 1.118        | 0.635        | 0.200        | Случай 5 с 14 | $P_5 > P_{14}$                 |
|           | 11.456             | 1.013        | 0.483        | 0.213        | Случай 4 с 15 | $P_5 > P_{15}$                 |
| <b>6</b>  | <b>(2+3)</b>       | 68.706       | 12.233       | 2.138        | Случай 6 с 11 | $P_6 < P_{11}$                 |
|           | 5.998 1.732 0.572  | 0.896        | 0.495        | 0.260        | Случай 6 с 13 | $P_6 > P_{13}$                 |
|           |                    | 1.528        | 0.483        | 0.213        | Случай 6 с 15 | $P_6 > P_{15}$                 |
| <b>7</b>  | <b>(3+4)</b>       | 1.587        | 0.495        | 0.260        | Случай 7 с 13 | $P_7 > P_{13}$                 |
|           | 1.69 0.728 0.429   | 1.637        | 0.635        | 0.200        | Случай 7 с 14 | $P_7 > P_{14}$                 |
|           |                    | 1.528        | 0.483        | 0.213        | Случай 7 с 15 | $P_7 > P_{15}$                 |
| <b>8</b>  | <b>(1+2)</b>       | 81.71        | 12.233       | 2.138        | Случай 8 с 11 | $P_8 < P_{11}$                 |
|           | 29.92 4.115 0.184  | 1.654        | 0.493        | 0.257        | Случай 8 с 12 | $P_8 > P_{12}$ , кроме мин     |
|           |                    | 1.528        | 0.483        | 0.213        | Случай 8 с 15 | $P_8 > P_{15}$                 |
| <b>9</b>  | <b>(2+4)</b>       | 1.654        | 0.493        | 0.257        | Случай 9 с 12 | $P_9 > P_{12}$ , кроме мин     |
|           | 1.783 0.500        | 1.587        | 0.495        | 0.260        | Случай 9 с 13 | $P_9 > P_{13}$ , кроме мин     |
|           | 0.251              | 1.528        | 0.483        | 0.213        | Случай 9 с 15 | $P_9 > P_{15}$                 |
| <b>10</b> | <b>(1+4)</b>       |              |              |              | Случай 10 с   | $P_{10} > P_{12}$ , кроме мин  |
|           | 1.617 0.879        | 1.587        | 0.493        | 0.257        | 12            |                                |
|           | 0.524              | 1.637        | 0.635        | 0.200        | Случай 10 с   | $P_{10} > P_{14}$ , кроме макс |
|           |                    | 1.528        | 0.483        |              | Случай 10 с   | $P_{10} > P_{15}$              |
|           |                    |              |              | 0.213        | 15            |                                |
| <b>11</b> | <b>(1+2+3)</b>     | 1.528        | 0.483        |              | Случай 11 с   | $P_{11} > P_{15}$              |
|           | 81.71 12.233 2.138 |              |              | 0.213        | 15            |                                |
| <b>12</b> | <b>(1+2+4)</b>     | 1.528        | 0.483        |              | Случай 12 с   | $P_{12} > P_{15}$ , кроме макс |
|           | 1.654 0.493        |              |              |              | 15            |                                |
|           | 0.257              |              |              | 0.213        |               |                                |
| <b>13</b> | <b>(2+3+4)</b>     | 1.528        | 0.483        |              | Случай 13 с   | $P_{13} > P_{15}$ , кроме макс |
|           | 1.587 0.495        |              |              |              | 15            |                                |
|           | 0.260              |              |              | 0.213        |               |                                |
| <b>14</b> | <b>(1+3+4)</b>     | 1.528        | 0.483        |              | Случай 14 с   | $P_{14} > P_{15}$ , кроме мин  |
|           | 1.637 0.635 0.200  |              |              | 0.213        | 15            |                                |
| <b>15</b> | <b>(1+2+3+4)</b>   | <b>1.528</b> | <b>0.483</b> | <b>0.213</b> |               |                                |

Аналогичные комплексы измерений были выполнены и для двух других параметров ЭМИ.

Наглядное представление всех 15 комбинаций с учетом количества источников ЭМИ в каждой дано в Табл.3.

Табл.3. Параметры ЭМИ с учетом количества источников ЭМИ в каждой комбинации.

|    | Источник ЭМИ       | Один                                                                           |        |                      | Два    |        |                      | Три и четыре |        |                      |
|----|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------|--------|--------|----------------------|--------------|--------|----------------------|
|    |                    | Н, А/м                                                                         | Е, В/м | Р, Вт/м <sup>2</sup> | Н, А/м | Е, В/м | Р, Вт/м <sup>2</sup> | Н, А/м       | Е, В/м | Р, Вт/м <sup>2</sup> |
| 1  | Мобильный телефон  | 17.77                                                                          | 6.697  | 115.027              |        |        |                      |              |        |                      |
| 2  | Ноутбук            | 7.397                                                                          | 2.846  | 20.027               |        |        |                      |              |        |                      |
| 3  | Wi-Fi              | 2.071                                                                          | 1.335  | 2.8691               |        |        |                      |              |        |                      |
| 4  | Микроволновая печь | 72.68                                                                          | 27.03  | 1.963                |        |        |                      |              |        |                      |
| 5  | (1&3)              | Мобильный телефон присоединен через Wi-Fi                                      |        |                      | 17.99  | 6.78   | 117.56               |              |        |                      |
| 6  | (2 &3)             | Ноутбук присоединен через Wi-Fi                                                |        |                      | 4.069  | 1.534  | 5.998                |              |        |                      |
| 7  | (3&4)              | Микроволновая печь в зоне действия Wi-Fi                                       |        |                      | 68.376 | 25.666 | 1.639                |              |        |                      |
| 8  | (1&2)              | Мобильный телефон около ноутбука                                               |        |                      | 9.31   | 3.51   | 29.92                |              |        |                      |
| 9  | (2 &3)             | Мобильный телефон присоединен через Wi-Fi                                      |        |                      | 67.92  | 26.86  | 1.783                |              |        |                      |
| 10 | (2 &4)             | Ноутбук в зоне действия микроволновой печи                                     |        |                      | 68.15  | 30.39  | 1.617                |              |        |                      |
| 11 | (1,2&3)            | Мобильный телефон и ноутбук присоединен через Wi-Fi                            |        |                      |        |        |                      | 14.996       | 5.534  | 81.71                |
| 12 | (1,2&4)            | Мобильный телефон и ноутбук находятся около микроволновой печи                 |        |                      |        |        |                      | 68.1         | 25.67  | 1.654                |
| 13 | (2,3&4)            | Ноутбук присоединен к Wi-Fi и находится около микроволновой печи               |        |                      |        |        |                      | 67.06        | 25.36  | 1.587                |
| 14 | (1,3&4)            | Мобильный телефон присоединен через Wi-Fi и находится около микроволновой печи |        |                      |        |        |                      | 68.87        | 25.96  | 1.637                |
| 15 | (1,2, 3&4)         | Все четыре источника в одном месте                                             |        |                      |        |        |                      | 96.184       | 25.658 | 1.528                |

При интерпретации полученных данных, обратим внимание на особые случаи превышения уровня ЭМИ для комбинации источников по сравнению с суммой интенсивности ЭМИ для каждого или, наоборот, заметного снижения. Как правило, результаты в 7 столбце вполне ожидаемы. Комбинации какого-либо

источника с другими дает мощность излучения больше, чем у этого источника. Но в столбце 7 указаны отклонения от общей тенденции для разных комбинаций с учетом сравнения максимального, среднего и минимального уровней излучения. Иногда максимальная мощность источника оказывается меньше максимальной мощности комбинации нескольких источников, хотя для средней и минимальной мощности ситуация оказывается обратной (строка 4). И, наоборот, минимальная мощность источника оказывается больше минимальной мощности комбинации нескольких источников (строка 10).

Практическую важность имеет ситуация, когда источник по любому параметру имеет уровень ЭМИ, близкий к максимально допустимому согласно нормативам работы с РЭА, но в комбинации с другими источниками ЭМИ его уровень может превысить допустимое это значение. Нормы по различным приборам, диапазонам частот и другим параметрам приведены в регулярных изданиях Международной комиссии по защите от неионизирующей радиации ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection), публикующих рекомендации по ограничивающей дозе магнитного и электромагнитного полей.

Особым случаем является наложение излучений двух источников, которые могут иметь близкие значения рабочей частоты. Например, это могут быть два сотовых телефона. В этом случае вследствие наложения колебаний (биений) почти четверть времени интенсивность любого параметра ЭМИ может иметь значение, превышающее значение единичного устройства, вплоть до удвоения интенсивности. В нашей работе этот случай специально не рассматривался.

#### **Глава 4. Технологии материалов для защиты от электромагнитного излучения и свойства этих материалов.**

С использованием технологических и теоретических подходов, описанных в главе 1, были изготовлены образцы нескольких типов защитных материалов. В первую группу входили образцы, изготовленные в российских организациях, производящих коммерческие стекла и фольги (табл.4).

##### **Таблица 4. Образцы материалов для защиты от электромагнитных излучений**

---

Образец 1 без фильтра

Образец 2 (материал № 1) Фольга с имплантированными НЧ

Образец 3 (материал № 2) стекло 1

Образец 4 (материал № 3) стекло 2

Образец 5 (материал № 4) стекло 3

Образец 6 (материал № 5) Пленка SSiSR PS4

Образец 7 (материал № 6) Пленка LLumar

---

Были исследованы три образца Института стекла с наночастицами переходных материалов, имплантированных в стекло (материал 1). Образец 6 (материал 5) SSiSR PS4 (Silver) выглядит как фольга. Защита от ЭМИ обеспечивается металлическим слоем, нанесенным на тонкую полимерную пленку. Еще один образец 7 (материал 6) – это пленка LLumar.

Также было исследовано уменьшение ЭМИ несколькими образцами стекла, покрытого пленками окиси индия и олова ИТО ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ), выполненными в нескольких вариантах (на приведенных ниже рисунках материалы 3,4,5). Этот вид материала широко используется в качестве прозрачных электродов в электрооптических и оптоэлектронных устройствах (дисплеи и фото-вольтаические элементы, соответственно). Для многих применений важно, чтобы материал поглощал РЧ ЭМИ будучи прозрачным. Образцы ИТО покрытий (рабочие номера № MS-3-09 (материал 2), N3203.20 (материал 3) и 9-12-20.2 (материал 4)) были получены методом магнетронного распыления на постоянном токе (режим DC) в рабочей среде Ar из мишени состава  $(\text{In}_2\text{O}_3)_{0,9}-(\text{SnO}_2)_{0,1}$ . Образцы 9-12-20.2 № MS-3-09 были нанесены на стеклянные подложки с добавлением кислорода с целью улучшения оптических характеристик прозрачного проводящего слоя. Слой ИТО N320320 был нанесен на подложку из полиэтилентерефталата. Образец ИТО покрытия № MS-2-2-44 наносился методом реактивного магнетронного распыления из 2-х мишеней In и Sn в среде кислорода. Для образцов этой группы помимо параметров защиты от ЭМИ было измерено оптическое пропускание.

Для двух исследуемых источников ЭМЗ результаты по электромагнитно-экранирующим свойствам стекол и фольги, выпускаемых промышленностью, представлены на рис.2 и 3.



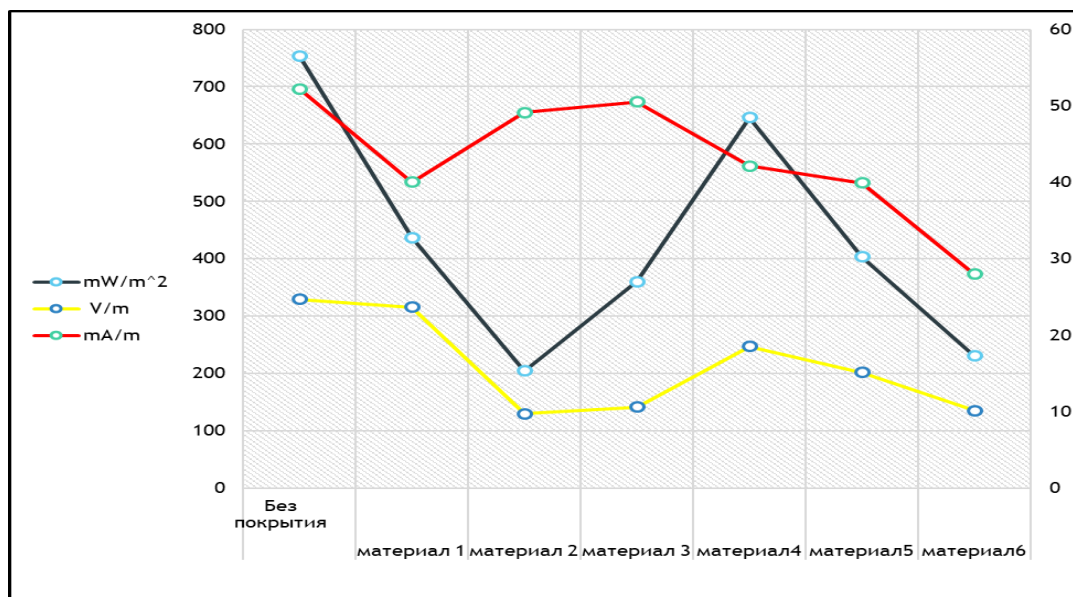


Рисунок 2. Три компонента ЭМИ), индуцированные работой мобильного телефона (мобильный Huawei Y7 Prime 2018 с частотой 1,4 ГГц + 1,1 ГГц, 1800 МГц) с электромагнитным экранированием и без него.

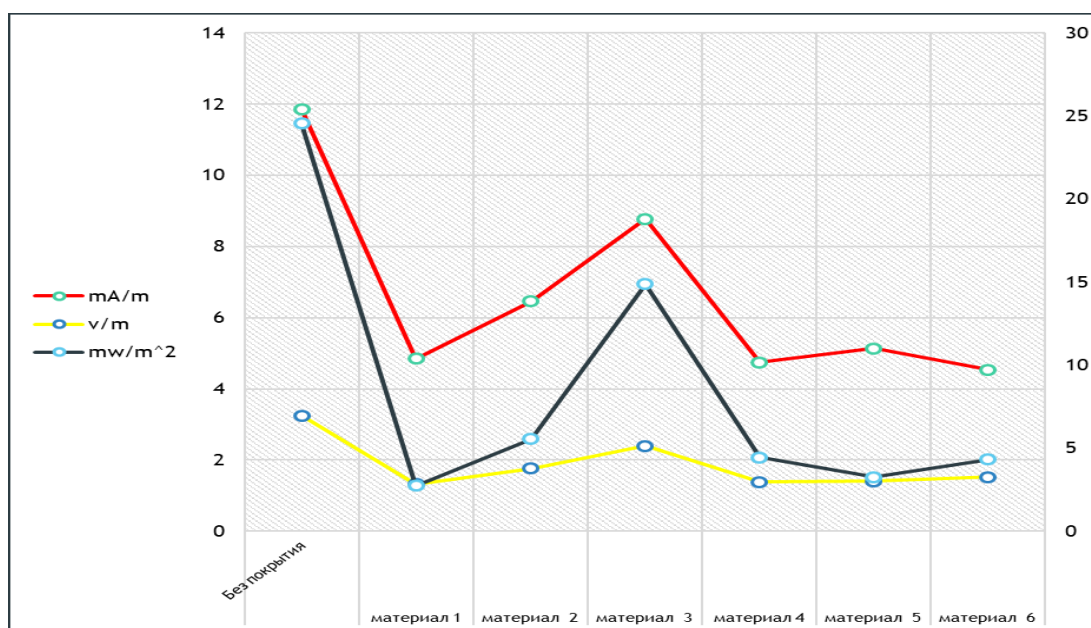


Рисунок 3. Три компонента ЭМИ от ноутбука (Lenovo ideapad 100-15IBD с процессором Intel ® core (TM) i3-5005u CPU@2.00GHz) с электромагнитным экранированием и без него.

В диссертации приведены рекомендации по различным материалам для защиты от ЭМЗ различных источников. Измерения показывают, что разные типы материалов по разному ослабляют исследованные компоненты ЭМИ от разных приборов в разных частотных диапазонах. По комплексу параметров ослабления

ЭМИ для защиты от СВЧ-излучения очень эффективным с точки зрения уменьшения воздействия электромагнитных волн является материал 1. В случае с ноутбуком лучше покрыть экран фильтром из ITO с добавлением кислорода (материал 2). Наивысшие характеристики ослабления в случае с мобильным телефоном и при подключении к сети Wi-Fi достигаются при использовании фильтра из ITO, нанесенного на подложку из полиэтилентерефталата (материал 3).

Кроме того, изучены процессы синтеза многослойных периодических структур (сверхрешеток) с высокой структурной разупорядоченностью на основе повторяющихся систем  $\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$ , а также их структура и физические свойства. Все рассматриваемые слои были получены на установке магнетронного распыления, оснащенной многопозиционным узлом нагрева подложек барабанного типа с индивидуальным заданием температуры каждого держателя подложек и двумя распылительными магнетронами, установленными в патрубках вертикальной цилиндрической рабочей камеры диаметрально по отношению к барабану с подложками.

Для проведения сравнительных исследований структуры слоев, величин их удельных сопротивлений и оптического пропускания в спектральном диапазоне  $\lambda = (400 - 750)$  нм были синтезированы следующие слои и многослойные структуры:

1. Нелегированный слой  $\text{ZnO}$ .
2.  $\text{ZnO}:\text{Al}$  (AZO, 3 at.%).
3. 2 пары слоев « $\text{ZnO}/\text{AZO}$ ».
4. 10 пар слоев « $\text{ZnO}/\text{AZO}$ ».
5. 50 пар слоев « $\text{ZnO}/\text{AZO}$ ».

Архитектура многослойных структур показана на рис. 4. Все слои синтезированы при температурах подложек 50, 100, 200 и 300°C в среде Ar.

На рисунке 5 приведены изображения поверхностей и поперечных сколов синтезированных слоев и многослойных структур. Приведенные изображения свидетельствуют о формировании слоев с типичной структурой поверхности и поперечных сколов для слоев  $\text{ZnO}$ , синтезированных методом магнетронного распыления. Слои имеют столбчатую структуру и выраженный рельеф поверхности.

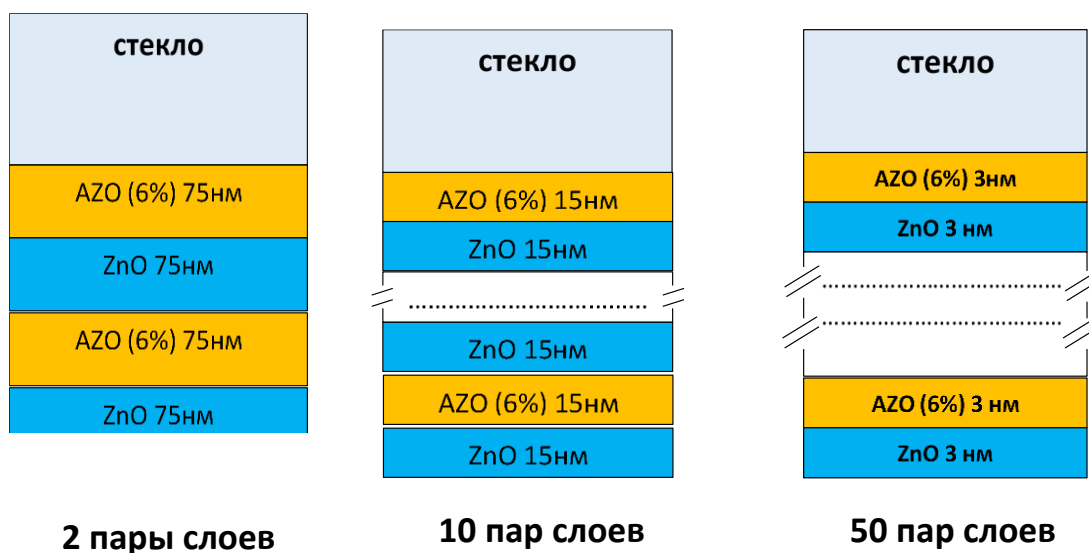


Рис. 4. Архитектура многослойных структур на основе повторяющихся систем ZnO/ZnO:Al.

Выполнены исследования холловских параметров, оптического пропускания, структуры нелегированных слоев ZnO, слоев ZnO:Al (AZO) и многослойных систем с числом повторяющихся пар ZnO/ZnO:Al до  $n = 50$  при температурах синтеза до  $300^{\circ}\text{C}$ , а также выполнена оценка уменьшения уровня электромагнитного излучения, проходящего через пленки с такими структурами. Установлены механизмы трансформации структур сверхрешеток ZnO/ZnO:Al с изменением толщины элементарных слоев и температур синтеза. Такая структура способствует повышению поглощения в мегагерцовом диапазоне. Показана возможность многофункционального использования таких покрытий в качестве прозрачных электродов дисплеев и уменьшения уровня электромагнитного излучения в 3-5 раз.

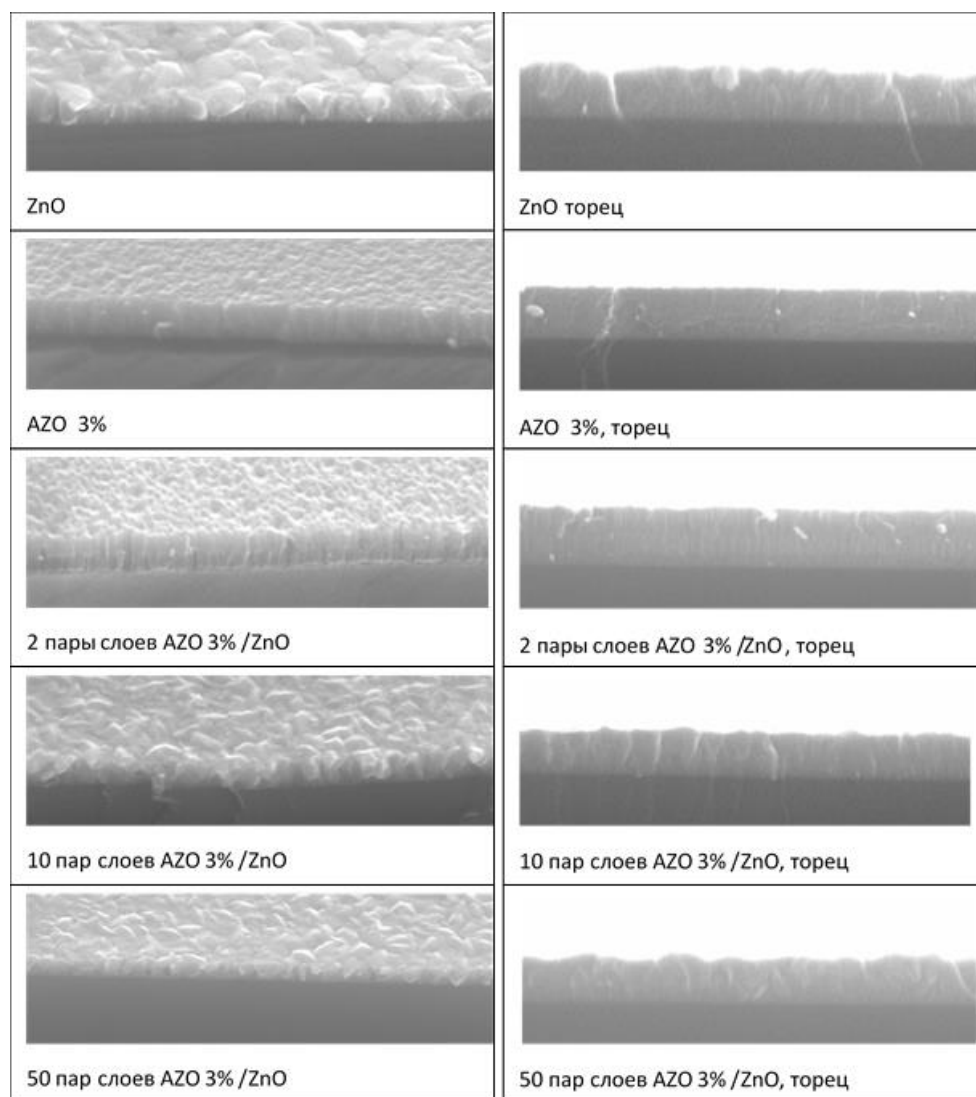


Рис. 5. СЭМ микрофотографии слоёв ZnO (а), AZO (б) и многослойных структур  $2 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  (в),  $10 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  (г) и  $50 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$  (д), синтезированных при  $300^\circ\text{C}$ . Масштаб .

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана оригинальная методика измерения уровня электромагнитного загрязнения от множества элементов радиоэлектронной аппаратуры, включающая в себя как измерение параметров электромагнитного излучения как элемента РЭА, так и в окружающем пространстве.
2. Выполнены измерения уровня электромагнитного загрязнения от разных элементов РЭА, работающих в диапазоне 1 МГц – 1 ТГц с мощностью излучения от 1 мВт до 1 Вт. Показано, что на расстоянии до 1 м от оператора уровень электромагнитного загрязнения при некоторых комбинациях элементов РЭА может превышать предельно допустимый уровень, предписанный нормативными документами для работы. Экспериментально показано, что наложение сигналов,

сформированных различными радиоэлектронными приборами, может приводить к превышению уровня допустимого облучения оператора.

3. Разработана и экспериментально верифицирована модель прогнозирования и оценки электромагнитного излучения от различных источников радиоэлектронных приборов. Справедливость предложенной модели, дающей расчетные значения для разных источников и их комбинаций, подтверждается согласием расчетных и экспериментальных данных. Расхождение расчетного и экспериментальных значений напряженности электрического поля ЭМИ варьируется от 1 до 9%, напряженности магнитного поля от 6 до 17%, мощности излучения от 0,2 до 25% для сложных комбинаций источников излучения.

4. Разработаны технологии материалов фильтров для защиты от электромагнитного излучения на основе стекла с имплантированными наночастицами переходных металлов, металло-пластиковой фольги, стекол с различными видами покрытий из окиси индия и олова (ИТО). Выполнены измерения уменьшения параметров электромагнитного излучения (напряженности электрического поля, напряженности магнитного поля, мощности излучения) при прохождении через пленки этих материалов. Покрытия из разработанных и исследованных материалов обеспечивают уменьшение параметров электромагнитного излучения – для ноутбука от 57 до 88%, мобильного телефона от 23 до 73%, микроволновой печи от 15 до 98%. Предложены рекомендации для практического применения для защиты от электромагнитного излучения различных радиоэлектронных приборов.

5. Продемонстрирована возможность создания стабильных пленок на основе окиси цинка для уменьшения параметров электромагнитного излучения. Изучен процесс синтеза многослойных периодических структур (сверхрешеток) с высокой структурной разупорядоченностью на основе повторяющихся систем  $\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$ , а также их структура и физические свойства.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Frah M A A, Belyaev V V. Evaluation of electromagnetic pollution index (EMPI) emitted from multiple sources. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2056 - 1, 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/2056/1/012057.
2. Frah M A A, Pavlushkina T, Babinova A, Belyaev V, Makeev M, Osipkov A, Konopleva E, Zhachkin V, Usachev V. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2056 - 1, 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/2056/1/012058.
3. M A A Frah and V V Belyaev, Parameters of electromagnetic pollution from different sources and their hazard impact // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1309 (2019) 012013. doi:10.1088/1742-6596/1309/1/012013.
4. A Abduev, A Akhmedov, A Asvarov, V Kanevsky, A Muslimov, V Belyaev, D Generalov, D Nikolaeva, J Tirado, M A A Frah. Advanced processes for low-temperature formation of functional metal oxide based thin films// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf IOP. 2056 (2021) 012046 doi:10.1088/1742-6596/2056/1/012046.
5. Махасин Фра, В. Беляев, И. Леонисова, Электромагнитное загрязнение от радиочастотных источников и их воздействие на человека // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. №6. С. 70-74 (2020). DOI: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.70.74.
6. Фрах М.А.А., Беляев В.В., Амин Б.Н.М., Беляев А.А. Электромагнитное излучение, сформированное несколькими радиоэлектронными приборами // Успехи современной радиоэлектроники <https://doi.org/10.18127/j20700784-202411-01>.
7. Абдуев А.Х., Ахмедов А.К., Мурлиев Э.К., Беляев В.В., Асваров А.Ш., Фрах М.А.А. Синтез многослойных структур на основе оксида цинка с периодической пространственной локализацией донорной примеси // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. С. 58-73. DOI: 10.18384/2310-7251-2022-3-58-73.
8. Махасин А.А.Ф. Многоисточник индекса электромагнитного загрязнения и его влияние на здоровье человека. // Журнал «Перспективы науки». № 5(128), С.18-20 (2020).

9. Махасин А.А.Ф. Удельная скорость поглощения и оценка влияния сложного загрязнения, создаваемого электромагнитной радиоволной // Журнал «Перспективы науки» № 7(130), С.33-35 (2020).

*Махасин Али Абделрхман Фрах*

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОТ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ НЕГО

### **Аннотация**

Диссертационная работа посвящена исследованию уровня электромагнитного излучения с учетом зон, где одновременно работают несколько элементов радиоэлектронной аппаратуры, и разработке технологии материалов фильтров для защиты от электромагнитного излучения. Разработана оригинальная методика измерения уровня электромагнитного загрязнения от множества элементов радиоэлектронной аппаратуры, включающая в себя как измерение параметров электромагнитного излучения как элемента радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), так и в окружающем пространстве.

Выполнены измерения уровня электромагнитного загрязнения от разных элементов РЭА, работающих в диапазоне 1 МГц – 1 ТГц с мощностью излучения от 1 мВт до 1 Вт. Показано, что на расстоянии до 1 м от оператора уровень электромагнитного загрязнения при некоторых комбинациях элементов РЭА может превышать предельно допустимый уровень, предписанный нормативными документами для работы. Экспериментально показано, что наложение сигналов, сформированных различными радиоэлектронными приборами, может приводить к превышению уровня допустимого облучения оператора.

Разработана и экспериментально верифицирована модель прогнозирования и оценки электромагнитного излучения от различных источников радиоэлектронных приборов. Разработаны технологии материалов фильтров для защиты от электромагнитного излучения на основе стекла с имплантированными наночастицами переходных металлов, металло-пластиковой фольги, стекол с различными видами покрытий из окиси индия и олова (ИТО) и окисла цинка.

ELECTROMAGNETIC POLLUTION FROM RADIOELECTRONIC ARRAYS AND  
MATERIALS TECHNOLOGIES TO PROTECT FROM IT

**Abstract**

The dissertation is devoted to investigation of electromagnetic radiation level taking into account zones with simultaneous operation of a few radioelectronic arrays as well as to development of technology of filters materials to protect from electromagnetic radiation. An original method has been developed to measure the electromagnetic pollution from multiple electronic devices including determination of electromagnetic radiation parameters of the element and its environment.

The measurements have been implemented in the range 1MHz — 1 THz with radiation power from 1 mW to 1 W. At a distance of 1 m from the operator the electromagnetic pollution level from some electronic arrays combinations can exceed the level prescribed by legal rules.

A model of prognosis and evaluation of electromagnetic radiation from multiple sources has been developed and experimentally checked. Technologies of a set of materials of filters to protect from electromagnetic radiation have been developed. They are based on glasses with embedded nanoparticles of transition metals, metal-plastic foil, glasses with different coatings on the base of indium-tin oxide (ITO) and zinc oxide.