

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМЕНИ ПАТРИСА
ЛУМУМБЫ»

На правах рукописи

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Беляев Виктор Васильевич

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	9
1.1. Введение в проблему	9
1.2. Электромагнитное поле и излучение.....	10
1.2.1. Электромагнитный спектр	12
1.3. Воздействие радиочастотного излучения на здоровье. Влияние мобильных устройств	12
1.3.1. Влияние Wi-Fi	16
1.3.2. Влияние ноутбуков	17
1.3.3. Влияние микроволновой печи	18
1.4. Электромагнитное излучение – облучение от наборов разных радиоэлектронных источников	20
1.5. Материалы для защиты от электромагнитного излучения	23
1.5.1. Стекла с имплантированными наночастицами	28
1.5.2. Защитные радиочастотные пленки из органических и металлорганических материалов	34
1.5.3. Защитные радиочастотные пленки на основе оксидов металлов	39
Глава 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА	42
2.1. Измерительные приборы	42
2.2. Описание экспериментов и выбор геометрии измерения	44
2.3. Описание радиоэлектронных приборов как источников электромагнитного загрязнения	49
2.3.1. Портативный компьютер (лэптоп)	49
2.3.2. Мобильный телефон	49
2.3.3. Wi-Fi 2300 МГц и Микроволновая печь	49
Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОТ МНОЖЕСТВА ИСТОЧНИКОВ	50
3.1. Модель электромагнитного загрязнения от множества источников	50
3.2. Параметры электромагнитного загрязнения от разных источников и их комбинаций, полученные при разных режимах работы	58

Глава 4. ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	74
4.1. Технологии получения материалов с наночастицами переходных материалов, имплантированных в стекло, и фольгированных материалов ...	75
4.2. Технология нанесения защитных пленок на основе стекла,	77
покрытого пленками окиси индия и олова ИТО (In_2O_3)	77
4.3. Технология синтеза структуры на основе оксида цинка с периодической пространственной локализацией донорной примеси для уменьшения уровня электромагнитного излучения	80
4.3.1. <i>Эксперимент</i>	81
4.3.2. <i>Результаты и обсуждение</i>	84
4.4. Особенности метода измерения параметров электромагнитного излучения для разных материалов.....	93
4.5. Результаты измерений	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
Общие выводы.....	108
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	110
Список источников:.....	111

Введение

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 проблема 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, 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 исследования

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

Научная новизна

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 $\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$.

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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика измерения параметров электромагнитного излучения для произвольного количества источников ЭМЗ и их возможных комбинаций в более широком 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

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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 исследования.

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.

Глава 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Введение в проблему

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 проблема 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, а также разработку методов ослабления ЭМИ [1].

Электромагнитное поле (ЭМП) и электромагнитное излучение (ЭМИ), особенно излучаемые в радиоволновом и микроволновом диапазонах, – существенные факторы загрязнения окружающей среды. Как показывает практика, их влияние увеличивается по мере распространения телевизоров, компьютерных мониторов, сотовых телефонов, электрических одеял, фотоаппаратов, микроволновых печей и других устройств, являющихся источниками ЭМП и ЭМИ. В статье рассматривается интенсивность ЭМИ в различных частотных диапазонах, обсуждается возможная его опасность для человека и животных.

По мере развития технологий, электронного и программного обеспечения сформировался еще один вид загрязнения окружающей среды – электромагнитное излучение, воздействию которого подвергаются люди и живые организмы. Человеку, независимо от его профессии и рода занятий, важно располагать достаточной информацией об электромагнитном загрязнении, излучаемом оборудованием. Рассмотрим эффекты источников ЭМИ, в основном

неионизирующего излучения. ЭМИ телекоммуникационных систем, микроволновых печей и других приборов зачастую игнорируется из-за низкого энергетического уровня. Однако оно представляет собой большую опасность в зависимости от продолжительности и интенсивности воздействия. Человек должен знать об опасности электромагнитного поля, внутри которого он находится, чтобы защитить себя.

1.2. Электромагнитное поле и излучение

Электромагнитные поля, излучаемые искусственными источниками, а также естественными источниками электрических и магнитных полей, распространены повсеместно. Примеры окружающих нас в повседневной жизни ЭМП с частотой излучения от 0,5 МГц до 6 ГГц приведены на Рисунке 1.1 [1,2].

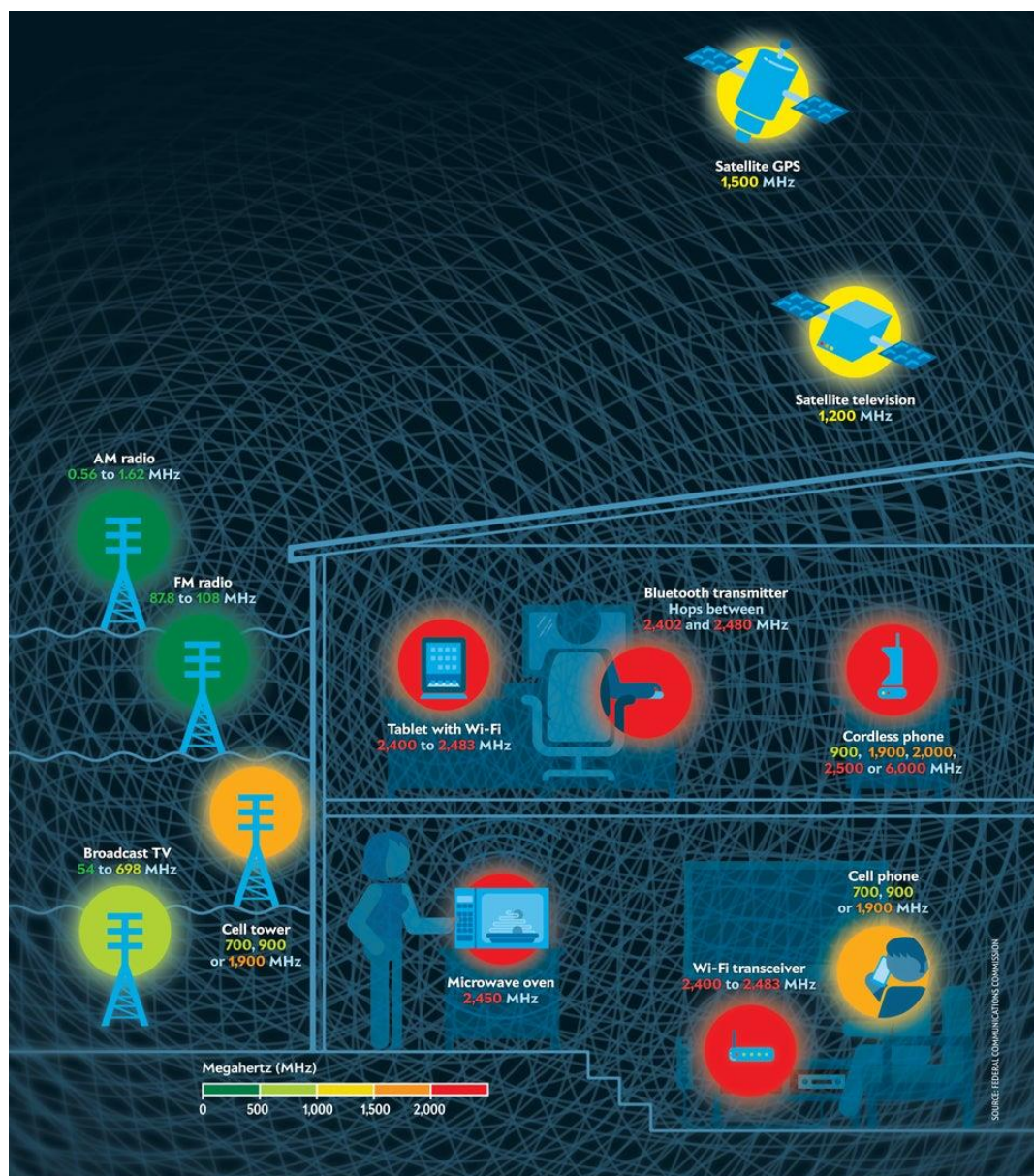


Рисунок 1.1 – Источники электромагнитных полей с частотой излучения от 0,5 МГц до 6 ГГц

Источник электромагнитного поля, расположенный очень близко к пользователю, может оказывать опасное воздействие в зависимости от интенсивности, длительности и частоты ЭМИ. Чем больше излучаемая энергия поля, тем выше частота и короче длина волны излучения. Рассмотрим различные источники ЭМИ.

ЭМ-излучение состоит в основном из двух компонентов: ионизирующего и неионизирующего. Ионизирующее излучение представляет собой высокочастотную ЭМ-волну с частотой выше 10^{15} Гц, способную ионизировать

атомные связи в молекулах клеток. Например, к этой категории относятся рентгеновские, гамма- и УФ-лучи. В результате чрезмерного их воздействия существует опасность повреждения живых клеток и цепочки ДНК. Неионизирующее излучение, не обладающее достаточной энергией для разделения атомных связей, характерно для видимого, инфракрасного, радиочастотного и микроволнового диапазонов спектра. Оно распределено в диапазоне частот от 1 Гц до 300 ГГц. Однако эти волны производят тепловые эффекты в зависимости от таких параметров, как расстояние, частота и время. В современных исследованиях обсуждаются и другие их эффекты.

1.2.1. Электромагнитный спектр

В настоящее время, в условиях индустриализации и развития технологий, возрастает значение электрической энергии. Помимо приведенных примеров, следует отметить все более активное использование GSM и другого электрического оборудования, играющего важную роль в нашей жизни. Однако его вклад в формирование электромагнитного поля также возрастает [3, 4]. Поэтому в ходе исследований необходимо уделять большое внимание измерению его характеристик.

1.3. Воздействие радиочастотного излучения на здоровье. Влияние мобильных устройств

В современной литературе основное внимание уделяется изменениям в деятельности человеческого мозга когнитивным или другим нервно-поведенческим особенностям, связанным с воздействием радиоволн. Мозг расположен очень близко к антенне мобильного телефона, поэтому изучение воздействия на него высокочастотного (ВЧ) ЭМП представляет научную ценность. Еще одна исследуемая проблема связана с возможным риском развития рака

головного мозга в результате воздействия ВЧ ЭМП мобильных телефонов. Однако использование мобильных технологий, доступных человеку уже десятки лет, в последние годы расширяется. Позади относительно длительный период ожидания и мониторинга причин проявления опасных для жизни человека заболеваний. Симптомы болезней, о которых сообщается в литературе, можно объяснить гиперчувствительностью, проблемами со сном и головными болями. По данным медицины, они возникают из-за радиочастотного (РЧ) воздействия [5]. Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения (МКЗНИ, International Commission Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) устанавливает ограничения и дает рекомендации в отношении воздействия ЭМП устройства. При этом определяется лимитируемая мощность поглощенной дозы на единицу массы. Англоязычный термин Specific energy Absorption Rate (SAR) можно перевести как мощность поглощенной дозы (МПД). Такой вариант предложили в публикации [6] сотрудники трех ведущих российских организаций в области дозиметрии – Медицинского радиологического научного центра Минздравсоцразвития России (Обнинск), Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна ФМБА России и Института медико-биологических проблем РАН. Для характеристики поглощенной энергии традиционно применяется термин «Удельная поглощенная мощность» (УПМ). МПД и УПМ (Specific Absorption Rate, SAR) определены как мера поглощения энергии излучения радиочастотного электромагнитного поля единицей массы человеческого тела или его ткани. Это же относится к другим видам энергии, поглощаемой биологическими тканями, в том числе ультразвуковой. МПД измеряется в Вт/кг.

Имеются нервно-поведенческие особенности, связанные с воздействием радиоволн. Мозг расположен очень близко к антенне мобильного телефона, поэтому изучение воздействия на него высокочастотного (ВЧ) ЭМП представляет научную ценность. Еще одна исследуемая проблема связана с возможным риском

развития рака головного мозга в результате воздействия ВЧ ЭМП мобильных телефонов.

Однако использование мобильных технологий, доступных человеку уже десятки лет, в последние годы расширяется. Позади относительно длительный период ожидания и мониторинга причин проявления опасных для жизни человека заболеваний. Симптомы болезней, о которых сообщается в литературе, можно объяснить гиперчувствительностью, проблемами со сном и головными болями.

Излучение электромагнитного поля вызывает опасность для организма человека. Источником опасности обычно является неионизирующее, электрическое, магнитное и радиоизлучение. Риски для здоровья пользователей ноутбуков определяются несколькими факторами, такими как продолжительность воздействия, расстояние, сила. Таким образом, для определения уровня ЭМП-загрязнения необходимо измерять его с помощью детекторов. За последнее десятилетие использование ноутбуков резко возросло. Это особенно актуально для молодежи. Из-за его портативности нам часто приходится пользоваться ноутбуком в тесном контакте со своим телом. Таким образом, он соприкасается с кожей, кровью, лимфой, костями и т. д. Обычное и регулярное использование ноутбука в таких условиях может привести к некоторым негативным последствиям для здоровья пользователя.

Следовательно, растет обеспокоенность в связи с наблюдаемым ухудшением состояния здоровья незащищенных лиц [7–17]. В основе этого лежит воздействие неионизирующего электромагнитного излучения с низкой частотой – до 300 Гц. Это безопасно и достаточно эффективно. Однако этот вопрос изучен лишь частично [18]. В литературе сообщается о возникновении гиперчувствительности к системам электромагнитного излучения в результате обычных воздействий, таких как бытовая техника, беспроводные системы, компьютерные системы и электроприборы в офисе или дома. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) информирует, что симптомы гиперчувствительности к электромагнитному излучению включают неврастенические, кожные и вегетативные симптомы [2].

Признаками электромагнитной гиперчувствительности являются ограничение дыхания, усталость, нерегулярное сердцебиение, ухудшение зрения, головная боль, ощущение жжения, тошнота, проблемы с памятью и концентрацией внимания, боль в конечностях, ригидность мышц и т.д. [8, 10, 16]. Согласно правилам безопасности SMEMSP [13], безопасное значение ЭДС магнитной индукции (до 800 Гц) составляет $2/f$, где f – частота ЭДС. Таким образом, безопасный предельный уровень известен как предельный уровень радиации, превышающий тот, при котором условия окружающей среды могут быть небезопасными для человека. В литературе безопасный уровень значений определяется в диапазоне от 0,2 до 0,4 мкТл [4, 7, 15]. В результате SMEMSP приняла Закон о защите от неионизирующего излучения [2, 13], который определяет случаи риска и меры защиты в критических ситуациях. Следует отметить, что Международная комиссия по неионизирующему излучению (ICNIRP) устанавливает различные пределы безопасности в отношении электромагнитных полей для людей и сотрудников. Таким образом, безопасный предел составляет $5/F$ для физических лиц и $25/F$ для сотрудников [16].

В статье [11] Д. Бродич рассматривает проблему излучения магнитного поля, исходящего от портативных компьютеров. Было измерено магнитное поле, полученное от 10 различных ноутбуков. Ноутбуки измеряются в “реальном” рабочем состоянии и при большой нагрузке (под напряжением). До сих пор никто не проводил различия между измерениями электромагнитных полей в различных условиях эксплуатации ноутбуков. Таким образом, результаты измерений сравниваются со стандартными значениями. Далее следует обсуждение оценки риска воздействия низкочастотной магнитной индукции на человека, связанного с портативными компьютерами, в зависимости от предлагаемых пределов безопасности. В заключении определяются направления дальнейшей исследовательской работы.

Методика калориметрического измерения МПД ЭМП частотой 450 МГц и ее распределения в организме в результате облучения мощностью 1 мВт/см²

описана в литературе [6] для разных поляризаций поля и положений тела. Усредненное значение МПД составляет $0,050 \pm 0,007$ Вт/кг для всех видов поляризаций поля и положений тела, а пиковый показатель 0,650 Вт / кг характерен для запястий.

МПД от мобильного устройства должна быть ограничена 2 Вт/кг в массе 10 г – для головы и торса, 4 Вт/кг – для конечностей и 0,08 Вт/кг – для всего тела. Показатели рассчитаны с учетом средней продолжительности воздействия 6 мин [12]. Федеральная комиссия по связи (Federal Communications Commission) США установила предельную МПД от сотовых телефонов на уровне 1,6 Вт/кг [2, 13].

По данным некоторых исследований, воздействие упомянутых величин МПД на массу, равную 400 г, чревато повреждением кровеносных сосудов человека, вызывающим смерть в течение 48 ч. В большинстве случаев облучаемая масса не должна превышать 10–40 г, что снижает повреждения кровеносных сосудов за счет предотвращения потери жидкости и дисбаланса в некоторых клетках [7, 13]. Ряд стран придерживается собственных протоколов. Предельный уровень облучения поверхности тела или его части не должен превышать значения $0,45 \text{ мВт/см}^2$, установленного МКЗНИ для мобильных телефонов. В некоторых странах, например США и Канаде, предусмотрен допустимый уровень воздействия до $0,57 \text{ мВт/см}^2$ [13].

1.3.1. Влияние Wi-Fi

Изучалось влияние на мышей радиочастотного излучения беспроводных устройств интернет-доступа Wi-Fi (с использованием стандарта 802.11.G на частоте 2,437 ГГц) как источников радиочастотных волн. Исследование показало, что ДНК животных повреждена. В экспериментальной группе были подтверждены низкие уровни лактозы, активности каталазы и

глутатионпероксидазы. По мнению ученых, это может быть связано с радиочастотным воздействием на активность фермента [15].

1.3.2. Влияние ноутбуков

Ноутбуки (LPTS) излучают магнитное поле и электрические сигналы сложной формы. Согласно исследованиям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), такое электромагнитное воздействие вызывает симптомы гиперчувствительности: болезненность кожи и нервов [3], снижение зрения, одышку, несбалансированное сердцебиение, проблемы с вниманием и памятью, головные боли, усталость и тошноту, боль в конечностях, скованность мышц, ощущение жжения и др. [8, 10, 16].

Параллельные и независимые исследования дали схожие результаты, и были получены типичные выводы, которые позволяют оценить безопасный уровень плотности магнитного поля как равный 0,33 мкТ [90].

В соответствии с нормами, установленными в законе о безопасности Министерства окружающей среды, горной добычи и пространственного планирования Республики Сербия (см. [11]), предельный уровень безопасности магнитного излучения ЭМП частотой f до 800 Гц пропорционален $2/f$. Следовательно, его можно определить как критический уровень излучения, при котором окружающая среда небезопасна для человека. Предельные значения уровня безопасности находятся в диапазоне 0,2 и 0,4 мкТл [4, 7, 15]. Упомянутый закон о безопасности дополнен актом «О защите от неионизирующего излучения» [2], устанавливает условия риска и меры защиты в критических ситуациях. Следует отметить, что МКЗНИ определил безопасные значения ЭМП для людей в доме – $5/f$, а для работников в организации – $25/f$ [13, 16].

1.3.3. Влияние микроволновой печи

Для этого типа приборов МПД зависит от интенсивности поля, его поверхностной плотности мощности и некоторых других характеристик биологических тканей, таких как геометрия, размер, направление объекта, на который осуществляется воздействие, частота поля и время воздействия. Принцип современной дозиметрии в диапазоне частот примерно от 100 кГц до 10 ГГц был недавно пересмотрен. Его можно вычислить с помощью уравнения:

$$SAR = \frac{dw}{dt} \quad (1.1)$$

Иными словами, физические и электрические параметры МДП (SAR) могут быть рассчитаны следующим образом:

$$SAR = \sigma \frac{|E|^2}{2\rho}, \quad (1.2)$$

где w – поглощенная энергия в джоулях;

E – напряженность электрического поля в В/м;

σ – проводимость ткани в См/м;

ρ – плотность ткани в кг/м³;

m – масса ткани в кг.

В заключение отметим, что в настоящее время интенсивно разрабатываются способы защиты от электромагнитного загрязнения. Некоторые методы представлены в обзоре [18].

Таблица 1.1 – Установленные МКЗНИ предельные уровни переменных электрических полей, воздействующих на человека

Диапазон частот, f	Напряженность электрического поля, В/м
До 1 Гц	–
1–8 Гц	10
8–25 Гц	10
0,8–3 кГц	250/f
3–150 кГц	87
0,15–1 МГц	87
1–10 МГц	87/f ^{1/2}
10–400 МГц	28
0,4–2 ГГц	1.375/f ^{1/2}
02–300 ГГц	61

Таблица 1.2 – Основные ограничения МКЗНИ в отношении электрических и магнитных полей в диапазоне частот от 10 МГц до 10 ГГц для профессионального и общественного воздействия [13]

Уровень облученности		Профессиональное воздействие, Вт/кг	Публичное воздействие, Вт/кг
Усредненная МПД	Облучение тела в течение 6 мин	0,40	0,08
Усредненная МПД	Облучение любых 10 г тела человека (мозг, туловище) в течение 6 мин	10	2
Усредненная МПД	Облучение любых 10 г конечностей человека в течение 6 мин	20	4

Таблица 1.3 – Измерение ЭМП вблизи некоторых бытовых/офисных приборов/электронных устройств [8].

Устройство	Вблизи устройства		На расстоянии 1 м от устройства	
	Магнитное поле, мТл	Электрическое поле, В/м	Магнитное поле, мТл	Электрическое поле, В/м
Компьютер	1	1500	0.1	300
Зарядное устройство ноутбука	6	800	0.4	50
Ноутбук	0.08	1500	–	80

1.4. Электромагнитное излучение – облучение от наборов разных радиоэлектронных источников

Большое количество радиочастотных устройств (мобильный телефон, компьютер, особенно портативный, Wi-Fi, микроволновая печь и т. д.) и растущая потребность в обеспечении беспроводной радиосвязью больших территорий и других видов электронных коммуникаций привели к увеличению локального электромагнитного загрязнения (ЭМЗ) [19]. Уровень ЭМЗ часто превышает требования к электромагнитной безопасности (ЭМБ) и надлежащему функционированию беспроводной сети [20, 21]. Оборудование создает риски, связанные с состоянием окружающей среды. Таким образом, распространенные опасения по поводу безопасности человека (опасности для здоровья), связанные с повышенными уровнями радиочастотного излучения, не вполне компенсированы [22–24]. Это привело к появлению важной области исследований в области электромагнитного загрязнения (ЭМЗ) и электромагнитной безопасности.

Электромагнитная среда (ЭМС) – это общие электромагнитные поля, создаваемые многочисленными средствами радиосвязи, естественными электромагнитными устройствами и операциями (действиями) в определенной области пространства и времени [23, 25–28]. Существует обширный список различных источников электромагнитного излучения.

Максимально допустимые пределы некоторых диапазонов функционирования электромагнитного поля могут быть превышены. Отдельные частоты связаны с работой электроприборов, электрических панелей, силовых и осветительных проводов, электричества, IT-устройств и бытовой техники. По этой причине при оценке уровня опасности источника электромагнитного излучения необходимо учитывать одновременное наличие нескольких источников электромагнитного излучения.

Наше исследование направлено на то, чтобы найти решение проблемы оценки небезопасного пребывания в электромагнитной зоне путем измерения излучения с учетом зон, где одновременно работают несколько источников электромагнитного излучения (возможно, на нескольких частотах) [27]. Конечным результатом исследования является обоснованная разработка мер по защите. Для снижения воздействия электромагнитного излучения используются новые технологические многочастотные принципы, управление электромагнитным полем и др. [13].

В литературе наиболее подробно исследовано облучение какой-либо местности от базовых станций мобильной телефонной связи, в том числе при наложении сигналов разных станций [24–26, 29–32]. При этом недостаточно изучено воздействие на меньшем масштабе сигналов от совершенно разных источников ЭМ сигналов.

Готовность оборудования радиосвязи к работе, качество обслуживания в определенном месте и в определенное время определяется электромагнитной средой (ЭМС) – по-английски, electromagnetic environment (EME). Функционирование источника является вредным, если плотность энергии от нескольких источников превышает величину, допустимую нормативными документами, – пороговый уровень S_{th} [33]. Когда мощность излучения от нескольких источников (для каждого источника i мощность излучения S_i) в какой-то момент объединяется в некоторой точке (x, y, z) , она может быть выражена как

$$P(x, y, z) = \sum S_i \sigma(\theta, \varphi) \forall S_i > S_{th}, \quad (1.3)$$

где $\sigma(\theta, \varphi)$ – геометрическая функция, описывающая распределение плотности мощности излучения по полярному и азимутальному углам.

На Рисунках 1.2 и 1.3 приведены примеры оценки вклада различных источников ЭМИ в облучение пользователя и распределение облучения некоторого пространства от нескольких базовых станций [29].

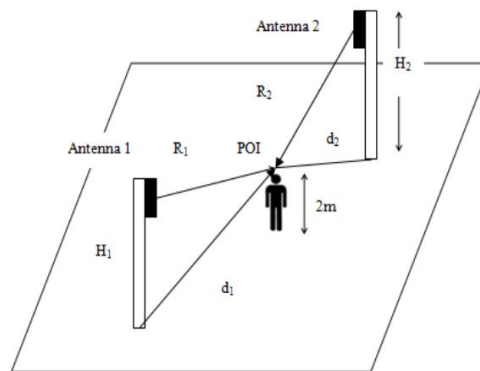


Рисунок 1.2 – Оценка мощности облучения пользователя от двух не совпадающих в пространстве РЧ источников [29]

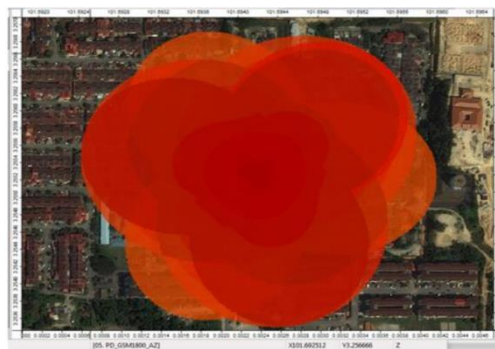


Рисунок 1.3 – Оценка уровня облучения несколькими РЧ источниками (базовыми станциями) некоторой области пространства [29]

1.5. Материалы для защиты от электромагнитного излучения

В этом разделе представлены основные физические эффекты и реализующие их материалы, используемые для защиты от ЭМИ. В основном, нами рассматриваются проблемы защиты от ЭМИ для оператора и РЭА.

Защитные фильтры или поглотители электромагнитных волн (ПЭВ) представляют собой структуры, устройства, конструкции из заданных материалов (как правило радиопоглощающих), имеющих определённую последовательность изменений диэлектрических и магнитных свойств.

ПЭВ обеспечивают эффективное поглощение электромагнитной энергии в требуемом диапазоне частот при незначительном её отражении или рассеянии. ПЭВ предназначены для оборудования безэховых камер (БЭК), имитирующих свободное пространство при испытаниях радиотехнических комплексов и антенных систем различного назначения, экранированных помещений, используемых для проведения аттестационных работ по сертификации технических средств на электромагнитную совместимость, а также для обеспечения защиты обслуживающего персонала от воздействия мощных источников энергии СВЧ.

В классическом представлении поглощение обусловлено вынужденными колебаниями электрических зарядов (или атомов) в переменном поле электромагнитной волны при условии, что существует канал диссипации энергии этих колебаний (обусловленный, например, трением или столкновением колеблющихся зарядов друг с другом, вследствие чего изменяются амплитуды и фазы их гармонических колебаний, то есть происходит переход энергии колебаний в тепловую энергию).

Обобщенная теория поглощения электромагнитной энергии приведена в монографиях [34, 35].

В диапазоне оптических телекоммуникаций (ИК и ТГц диапазон) «диэлектрическая проницаемость поглощающей пленки описывается моделью Друде, в которой падающий свет взаимодействует со свободными носителями в материале, и их отклик становится резонансным на плазменной частоте

$$\omega_p = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty m}$$

и в то же время» [36–39]

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty m (\omega^2 + i\omega\gamma)}$$

Примеры поглощения ЭМИ в результате таких резонансов приведены в [40].

По физическому принципу работы поглотители электромагнитных волн делятся на три группы. В первой группе уменьшение энергии отражённых волн достигается путём их гашения вследствие интерференции, возникающей у поверхности материала поглотителя, который выполняется в виде плоских однослойных или многослойных плит. У второй группы ПЭВ энергия электромагнитной волны превращается в тепловую за счёт диэлектрических потерь, а также за счёт рассеяния при распространении волны в поглотителе, имеющем структурную неоднородность.

Ко второй группе ПЭВ относятся все поглотители, которые поглощают большую часть энергии, прежде чем электромагнитные волны достигнут отражающей поверхности и, поэтому их радиотехнические характеристики не зависят от металлического экрана рабочих поверхностей БЭК. Данная группа поглотителей имеет огромное разнообразие конструкторских решений в виде сотовых, трубчатых, ячеистых, конусных, пирамидальных, воронкообразных, клиновидных образований, а также в виде накидок, ковровых дорожек, пористых резиновых коврик и других вариантов ПЭВ, основным принципом конструкции

которых, является постепенное нарастание в структуре поглотителя содержания частиц, обеспечивающих поглощение электромагнитного поля.

К третьей группе относятся ферромагнитные ПЭВ, взаимодействующие с Е- и Н- полями и имеющие электрические и магнитные потери. Выпускаются они, в основном, в виде ферритовых плиток или резиновых ковриков. Создание на их основе комбинированных ПЭВ, в настоящее время, является перспективным и актуальным направлением развития в этой области.

Мы рассматриваем радиопоглощающие материалы (РПМ) – композиционные материалы, состав и структура которых обеспечивает эффективное поглощение (при незначительном отражении) электромагнитной энергии в определённом диапазоне длин радиоволн.

«В теории поглощения энергии электромагнитного излучения мелкодисперсными металлическими частицами с помощью кинетического уравнения для функции распределения электронов дана оценка температурной и частотной зависимостей сечения поглощения внешнего переменного электромагнитного поля малой металлической частицей. При этом считается, что радиус частицы R удовлетворяет неравенству $l_{ee} \ll R \ll \lambda$, где l_{ee} – длина свободного пробега электрона; λ – длина волны электромагнитного излучения. Найдено общее выражение для сечения поглощения при произвольном соотношении между линейным размером частицы и толщиной скин-слоя. Исследовано влияние изменения температуры частицы под действием внешнего переменного электромагнитного поля на сечение поглощения. Доказано, что при $R \ll \lambda$, $R \ll l_{ee}$ сечение поглощения следует вычислять с помощью квантово-механических принципов, считая температуру электронов равной нулю» [41].

РПМ используют для уменьшения эффективной отражающей поверхности наземных, морских, летательных и других объектов с целью их противолокационной маскировки, а также для оборудования испытательных камер в области антенной техники, в радиотехнической аппаратуре, в антенно-

фидерных трактах, в защитных конструкциях и устройствах, препятствующих проникновению электромагнитного поля и в других случаях, когда необходимо снизить нежелательное распространение СВЧ излучения, в том числе при обеспечении экологической безопасности.

При взаимодействии электромагнитного поля с РПМ в последних имеет место поглощение, рассеяние и интерференция радиоволн. Требование максимального поглощения и минимального отражения электромагнитного поля противоречиво и трудновыполнимо для радиопоглощающих материалов.

Задача разработки РПМ сводится к созданию на защищаемой поверхности неоднородного слоя, который будет являться согласованной нагрузкой для падающей электромагнитной волны. Свойства этого слоя, в частности диэлектрические потери, должны плавно изменяться с изменением толщины материала или иметь определённые характеристики комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в заданном диапазоне частот. В этом случае при создании РПМ необходимо стремиться к тому, чтобы основной вклад в величины эффективных проницаемостей материала давали их мнимые составляющие, значения которых были бы высокими и стабильными во всём диапазоне рабочих частот. Действительные составляющие при этом стремились к единице, что соответствует лёгким, пористым, вспененным структурам.

По характеру взаимодействия с электромагнитными полями радиопоглощающие материалы можно разделить на две основные группы:

- 1) диэлектрические, взаимодействующие с Е-составляющей электромагнитного поля, имеющие только электрические потери;
- 2) ферромагнитные, взаимодействующие с Е- и Н- составляющими электромагнитного поля, имеющие электрические и магнитные потери;

В современных разработках РПМ для поглощения энергии электромагнитных волн используются в основном традиционные

электропроводящие дисперсные (сажи, графит, металлические частицы), волокнистые (углеродные, металлические, металлизированные полимерные) и магнитные (спечённые ферритовые пластины, порошки ферритов, карбонильное железо и др.) наполнители, применяемые как по отдельности, так и совместно, образуя сложные композиционные структуры.

Радиопоглощающие материалы изготавливаются в виде лаков, красок, герметиков, полимеров, тканей, плиток, пеномасс, наполненных резин, строительных плит, сыпучих смесей и в других вариантах различных композиций, являясь основными компонентами при создании поглотителей электромагнитных волн, которые используются для оборудования безэховых камер.

Обзор таких материалов и технологий их изготовления приведен ниже.

При этом следует учесть, что в современной (2024 г.) статье по таким материалам констатируется, что «... исследование таких материалов и приборов находится в самом начале» (по-английски «The research of EM devices is still in its infancy» [42]).

В настоящее время весьма актуальными являются вопросы защиты от воздействия ЭМИ в широком диапазоне частот. Металлы характеризуются высоким коэффициентом поглощения и полному отсутствию волнового сопротивления, благодаря чему обладают высокой отражающей способностью и широко применяются для экранирования ЭМИ. Но металлические экраны являются непрозрачными или полупрозрачными (сетки) что приводит к затемнению рабочих помещений и необходимости создания искусственного освещения рабочих мест.

Наряду с материалами, способными поглощать или только отражать электромагнитную энергию сверхвысоких частот, существуют полупроводники, которые одновременно поглощают и отражают ЭМИ, в частности оксидные оловянные пленки за счет своей высокой проводимости. При этом стекла с пленками остаются прозрачными в отличие от металлов.

Радиозащитные стекла с оксидным оловянным покрытием, выпускаемые промышленностью, обладают повышенным коэффициентом отражения за счет различия в величинах коэффициента светопреломления стекла (1,52–1,53) и пленки (1,7–1,92).

1.5.1. Стекла с имплантированными наночастицами

В АО «Институт стекла» (г. Москва) созданы новые типы радиационно-защитных смотровых окон, характеризующихся высокой светопрозрачностью и ослаблением электромагнитного излучения.

Предварительные измерения ослабления интенсивности ЭМИ показали, что силикатное листовое оконное стекло при толщине 5 мм ослабляет излучение на 2–3 дБ, в то время как фосфатные стекла, где стеклообразователем является пентоксид фосфора, на 7–9 дБ при длине падающей волны в 3 см. Введением в составы фосфатных стекол оксидов переходных элементов можно существенно увеличить эффективность радиозащиты.

Основы технологии стекол для защиты от различных видов излучений заложены в [43–47].

В «Институте стекла» «создана технология получения прозрачных радиозащитных материалов на основе строительного листового стекла путем имплантации ионов переходных элементов в его поверхностный слой.

Наночастицы (НЧ), внедренные в вещество, придают ему свойства, значительно отличающиеся от свойств исходного материала.

Одним из методов, используемых для создания НЧ в диэлектриках, является ионная имплантация. В процессе ионной имплантации поверхность стекла облучается тяжелыми ионами, ускоренными до энергии от нескольких кэВ до нескольких МэВ» [48].

«Происходит частичное распыление подложки с внедрением (имплантацией) в нее ускоренных ионов. Ионная имплантация имеет преимущества перед другими методами получения наночастиц, благодаря способности образовывать большие объемы фракций НЧ в приповерхностном слое, возможности контроля размера частиц, глубины и ширины слоя на микронной шкале. Возможно имплантировать в стекла катионы различных элементов и стекло остается прозрачным. Размер частиц зависит от полной дозы облучения, плотности тока, температуры подложки (стекла), а глубина проникновения имплантируемых частиц определяется энергией заряженных частиц и их атомной массой.

Вероятной причиной поглощения ЭМИ образующимися в поверхностном слое стекла НЧ является диссипативный резонанс. Это явление нарастания колебаний в распределенной колебательной системе под действием внешних периодических сил за счет образования упорядоченной структуры. Под действием синхронной внешней силы (монохроматической электромагнитной волны), частицы перемещаются вдоль некоторых направлений. При определенных условиях неравномерность распределения частиц будет уменьшаться, а амплитуда колебаний увеличиваться. В имплантационном слое формируется периодическая структура порядка в виде участков с повышенной плотностью числа частиц, колеблющихся с большой амплитудой, т.е. электромагнитные колебания переходят в механические» [48].

Можно «получить высокую плотность металлических частиц размером 10–50 нм в тонком поверхностном слое стекла» [49], что приводит к поглощению электромагнитного излучения мм и см диапазона путем рассеяния и отражения на металлических коллоидных частицах

«Синтезированы модельные стекла с имплантированными НЧ и исследованы их свойства с целью выбора оптимального импланта.

Синтезированные модельные стекла имеют следующий молярный химический состав: $64\text{SiO}_2 - 2\text{Al}_2\text{O}_3 - 15\text{Na}_2\text{O} - 5\text{MgO} - 10\text{CaO} - 4\text{B}_2\text{O}_3$ (состав S-1) и $65\text{P}_2\text{O}_5 - 10\text{B}_2\text{O}_3 - 10\text{Al}_2\text{O}_3 - 15\text{MgO}$ (состав P-1). Использовалось также листовое флоат-стекло, имеющее следующий состав в масс. %: $\text{SiO}_2 - 72,25$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,75$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,07$; $\text{CaO} - 8,95$; $\text{MgO} - 4,15$; $\text{Na}_2\text{O} - 13,4$; $\text{K}_2\text{O} - 0,2$ и $\text{SO}_3 - 0,23$ (состав S-2).

Проваренные и осветленные стекла выливались на подогретую металлическую плиту и плоские образцы отжигались в муфельной электрической печи при температурах $670\text{ }^\circ\text{C}$ (состав S-1) и $570\text{ }^\circ\text{C}$ (состав P-1) при времени выдержки один час. Снижение температуры до комнатной проходило в режиме остывающей печи.

Из отоженных образцов стекол методом шлифовки и полировки изготавливались пластины разного размера от $30\times 30\times 4\text{ мм}$ до $10\times 10\times 0,5\text{ мм}$.

На синтезированных модельных стеклах проводили имплантацию ионами переходных элементов при энергии $E = 150\text{ кэВ}$ и потоках (F) меняющихся в диапазоне от $2,10^{15}$ до $5,10^{17}$ ионов/ см^2 . Плотность потока $j = 0,5-1\text{ мкА/см}^2$. Стекла исследованы с помощью ЭПР и оптической спектроскопии в видимом и ближнем УФ диапазоне» [48].

«При дозе 10^{17} см^{-2} размер частиц колеблется от 5 до 10 нм. На Рисунке 1.4. приведен профиль распределения вольфрама по глубине слоя. Профиль имеет почти гауссову форму с максимумом при 80 нм, сдвинутом в сторону поверхности по сравнению с элементами первого переходного ряда, так как W – более тяжелый элемент» [50].

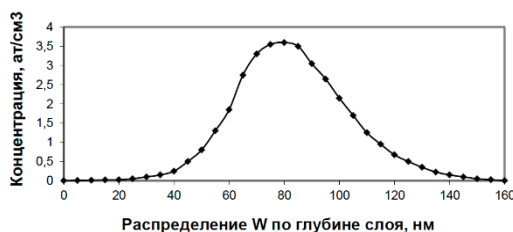


Рисунок 1.4 – Распределение вольфрама по глубине слоя для стекла S-1, имплантированного W⁺ до дозы $5,10^{16} \text{ см}^{-2}$

«Измерения поглощения электромагнитного излучения диапазона 3 см проводились с использованием волноводного тракта радиоспектрометра РЭ-1306. Источником излучения служил клистронный генератор мощностью 50 мВт, на выходе которого стоял аттенюатор, позволявший регулировать выходящую мощность в широких пределах. Далее шла система волноводов, подводящая сигнал к детекторной секции, соединенной с миллиамперметром, измеряющим выпрямленный детектором ток, пропорциональный мощности. Исследуемый образец стекла зажимался фланцами двух отрезков волноводном тракте» [48].

В Таблице 1.4 даны полученные экспериментальные результаты [48–50].

Стекла на силикатной основе обладают более высоким радиозащитным эффектом в отличие от стекла Р-1, где стеклообразователем является пентоксид фосфора. Наибольшее ослабление электромагнитного излучения наблюдается в имплантированном стекле (S-1 и S-2), содержащем металлические коллоидные частицы размером порядка 5 нм и однородным по своей величине в отличие от образующихся композитов переходных металлов и оксидов. Наиболее высокое поглощение электромагнитного излучения наблюдается в случае выделения в поверхностном слое ферромагнитных металлических наночастиц кобальта и никеля.

Таблица 1.4 – Ослабление мощности электромагнитного излучения при длине волны 3 см стеклами, имплантированными переходными элементами

№№ пп	Имплантант	Ослабление мощности излучения, дБ		
		Стекло Р-1	Стекло S-1	Стекло листовое S-2
1.	-	3,6	2,0	2,8
2.	Титан, Ti	6,2	8,4	7,8
3.	Ванадий, V	11,4	16,3	18,2
4.	Хром, Cr	9,8	11,6	12,4
5.	Марганец, Mn	9,6	14,2	15,3
6.	Железо, Fe	20,2	28,6	29,4
7.	Кобальт, Co	28,4	32,6	32,5
8.	Никель, Ni	30,2	34,1	34,6
9.	Медь, Cu	20,3	29,6	28,4
10.	Вольфрам, W	18,6	22,8	24,7
11.	Молибден, Mo	9,7	18,4	16,3

«Степень поглощения электромагнитного излучения имплантированного переходными элементами листового оконного стекла (S-2) возрастает после термической обработки при 610 °С в восстановительной атмосфере водородно-аргоновой среды (Таблица 1.5). При этом в структуре поверхностного слоя наблюдаются сферические частицы, размер которых увеличивается от 5 нм при дозе облучения $5,10^{16} \text{ см}^{-2}$ до 10 нм при дозе 10^{17} см^{-2} благодаря восстановлению ионов до металлического состояния и объединения их в кластеры» [48].

«На Рисунке 1.5. показаны микрофотографии, полученные с помощью просвечивающего микроскопа для стекла S-1, облученного при дозах $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Как следует из этих фотографий, частицы имеют сферическую форму в стеклах благодаря поверхностному натяжению на границе частицы и матрицы стекла. Размер частиц увеличивается с дозой облучения» [48].

Таблица 1.5 – Ослабление мощности СВЧ излучения имплантированным термообработанным стеклом S-2

№№ пп	Имплант	Ослабление мощности измерения, дБ
1.	Железо, Fe^+	31,6
2.	Кобальт, Co^+	36,2
3.	Никель, Ni^+	37,4
4.	Медь, Cu^+	32,3
5.	Вольфрам, W^+	29,5

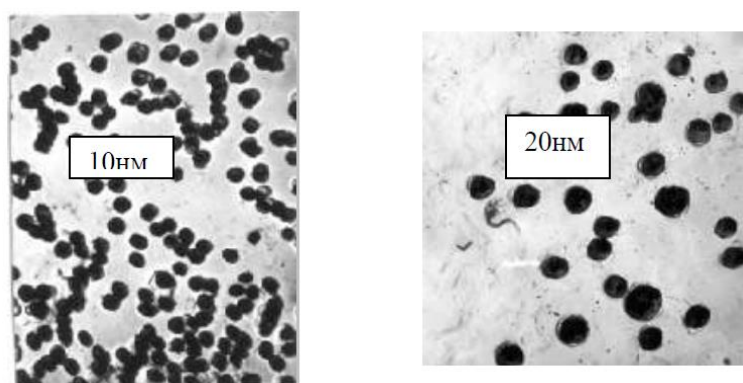


Рисунок 1.5 – Фотографии стекла S-1, имплантированного Co^+ при дозах $D = 3 \times 10^{16}$ (слева) и $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (справа), полученные методом просвечивающей электронной микроскопии

«Измерения поглощения электромагнитного излучения имплантированными модельными и листовыми стеклами показало, что ослабление мощности ЭМИ находится в пределах 6,2–30,2 дБ для фосфатного стекла и 7,8–34,1 дБ для силикатных стекол. Наибольший радиозащитный эффект наблюдается на стеклах, имплантированных никелем (Ni^+) и кобальтом (Co^+). Степень поглощения ЭМИ можно увеличить до 37,5 дБ путем проведения термообработки при 610 °С в восстановительной атмосфере в водородно-аргоновой среде. Выбор вида имплантируемого переходного элемента и режимов облучения листового оконного стекла позволил получить в его поверхностном слое наночастицы, поглощающие электромагнитное излучение СВЧ диапазона. Радиозащитный эффект сочетается с высокой прозрачностью стекла, т.к. наночастицы образуются в слое, не

превышающим 110 нм в отличие от известных радиопоглощающих стекол непрозрачных или окрашенных до насыщенных цветов в видимой области спектра. Разработанное стекло может быть успешно использовано для остекления детских и лечебных учреждений, оздоровительных комплексов и жилых домов, обеспечивая защиту людей от воздействия электромагнитного излучения» [48].

Таким образом, в результате исследований и разработок, выполненных в Институте стекла [48–52] получено:

1. «При имплантации до доз $F \approx 10^{16} \text{ см}^{-2}$ все переходные элементы входят в стекло в изолированном состоянии и валентных формах, типичных для этих элементов, введенных в стекломассу в небольших количествах вместе с шихтой.

2. Увеличение дозы от 10^{16} до $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ приводит к тому, что изолированные ионы начинают агрегироваться в кластеры, связанные спин-спиновыми взаимодействиями, которые, в свою очередь, являются предшественниками образования наночастиц.

3. Высокодозовая имплантация порядка $6 \cdot 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводит к образованию в облучаемых стеклах наночастиц различного типа: оксидов (MnO , VO_2 , Cr_2O_3 , CrO_2 и т.д.); сложных соединений (например: Ti_xPO_4), коллоидных металлических частиц (Co , Ni , Cu , W)» [48].

1.5.2. Защитные радиочастотные пленки из органических и металлоорганических материалов

Многие группы работают с металлизированными пластиковыми фильтрами или фольгированными защитными РЧ пленками благодаря таким свойствам как гибкость, легкий вес, простая обработка, возможность резания. Самыми известными являются пленки Сильвер (Silver) [53,54] и ЛЛюмар (LLumar) [55].

Silver является пленкой с односторонней видимостью, она выглядит как непрозрачное зеркало. Пленки изготавливаются с нанесением металлизированного слоя на прозрачный полиэстер. Процесс металлизации: рулон полиэстера наматывается на охлаждаемый водой ролик в большой камере, а воздух откачивается для создания вакуума. Металл, обычно это алюминий, испаряется на холодную поверхность пленки. Полиэтиленовая прозрачная пленка имеет толщину порядка 23 мкм. Указанная металлизированная пленка снижает ЭМИ на 18–22 дБ при частоте 300 МГц и до 35–38 дБ при частоте излучения выше 2000 МГц.

Пленки Silver модификации RDF [53, 54] являются прекрасным решением для экранирования окон, лоджий и других изделий в широком диапазоне частот (ВЧ, СВЧ). Они имеют следующие характеристики: RDF62 ослабление 22 дБ (по мощности 158 раз); светопропускание 62%; толщина пленки 37,5 мкм.

У пленок FAM такие преимущества. Они обеспечивают высокоэффективное подавление шума в диапазоне частот от 10 МГц до 60 ГГц; Они подавляют переотражения сигналов от экранов; у них высокое поверхностное сопротивление (10^6 – 10^8 Ом); их легко отрезать от больших листов (400×400 мм) и легко собирать. Среди международных компаний по изготовлению коммерческих защитных пленок наиболее известны Hollandshielding Co. и Soliani EMC [56, 57]. Пример очень легкого материала для защиты от ЭМИ представлен в [58].

Сейчас разрабатываются многие другие пластиковые фильтры со сложной структурой композитного материала [59, 60], например, защитные фильтры, состоящие из полимеров с нагруженными (reinforced) углеродными волокнами, композиты на основе сеток из металлических проволок [59] или защитные пленки, покрытые размолотым магнитным порошком на ПЭТ (полиэтилентерефталат) подложке [60].

Для многих применений, в том числе для образовательных организаций, нужны гибкие, но не хрупкие защитные фильтры. Гибкость и одновременно

хорошая проводимость обеспечиваются защитными фильтрами на основе полимерных пленок с графеном и серебряными нанопроволоками, а также другими нанонаполнителями и добавками магнитных частиц [42].

Микроволновые поглотители часто страдают от усадки из-за изменения температуры и соответствующего рассогласования импедансов, что приводит к потере проводимости пленок. Поэтому для повышения поглощения ЭМИ при различных температурах ведутся разработки материалов с повышенными температурно-влажностными характеристиками, например, полидеметилсилоксана (ПДМС или PDMS) с нанотрубками из нитрида титана. Кроме того, эффективным оказывается использование оловянных нанотрубок, получаемых методом электроспиннинга (электроформования) и термической обработки. Композиты ПДМС-олово с содержанием олова 25% имеют высокое РЧ поглощение в диапазоне температур от 298 до 573 К [61].

Перспективным материалом для защиты от ЭМЗ в ГГц и ТГц диапазонах являются HMN композитные пленки (Hollow Metal–Organic Framework/MXene/Nanocellulose, по-русски пустотелая органометаллическая сетчатая структура с MXene и наноцеллюлозой) [62]. MXenes (МКсены) представляют собой класс двумерных неорганических соединений, состоящих из наборов тонких (толщиной в один атом) слоев карбидов или нитридов или карбонитридов переходных металлов (Рисунок 1.6) [63].

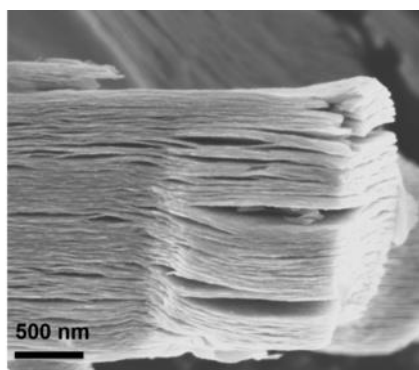


Рисунок 1.6 – СЭМ фотография МКсен структуры, изготовленной методом травления Ti_3AlC_2 в плавиковой кислоте

Кроме защиты от ЭМИ, такие материалы могут применяться в переключаемых спектральных фильтрах, антеннах для устройств сбережения энергии, стелс установках. В [64] описаны методы синтеза, структура и свойства таких гибридных материалов.

Аналогичные структуры с композитными наночастицами $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{УНТ}/\text{Со}$ являются сверхтонкими, благодаря значительному отражению ЭМ волн эффективность защиты составляет до 110 дБ. Такой нанокompозит состоит из элементов, имеющих размерность 2, 1 и ноль (2D/1D/0D construction) [65].

Использование УНТ для защиты от ЭМИ в диапазоне 5,67 ГГц описано в [65]. Из блоков МКсена сформированы многостенные УНТ. Эта технология довольно сложная. Исходная смесь для изготовления композита содержит полистироловые микросферы, порошок Ti_3AlC_2 , гексагидрат нитрата кобальта, 2-метилимидазол, обезвоженный метанол и раствор катионного полимерного электролита – хлорида поли(диаллилдиметиламмония) (ПДДА или PDDA) [66].

Поглотитель HMSSo с кобальтом изготавливается при облучении в ультразвуковой ванне и травлении в растворе HCL-LiF , чтобы сформировать наноллисты МКсена с несколькими слоями. Эти слои оказываются отрицательно заряженными и поэтому они образуют с помощью водородных связей самоорганизованную структуру на сферах ПДДА и полистирола. На этих сферах происходит самоорганизация металл органического каркаса из цеолитного имидазолатата (Zeolitic imidazolate framework-67 (ZIF-67), Рисунок 1.7, после чего полистирольный шаблон удаляется при высокотемпературном кальцинировании. Ссылка на эту работу приведена, чтобы показать, что технологии с использованием НЧ на основе углерода для защиты от ЭМИ являются сложными по исполнению и требуют использования экологически вредных реактивов, в том числе и при повышенной температуре.

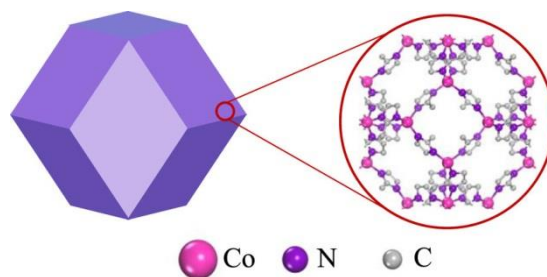


Рисунок 1.7 – Структура цеолитной частицы ZIF-67. Розовый: Co; пурпурный: N; серый: C; H не показан [67]

МКсен структуры на основе частиц $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ могут быть изготовлены по бионическим (биомиметическим) технологиям. В [68] описано производство полых микросфер из $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x@\text{ZnO}$. Микросферы похожи на ежей, они имеют сферическую основу с функцией фоточувствительности и регулярный хребет из молекулярных фрагментов. Такие «ежики» обеспечивают защиту от ЭМИ за счет потерь при отражении на 57,4 дБ при 6,56 ГГц.

Высокое поглощение ЭМ волн достигнуто при использовании сложного композита с полупроводниковыми частицами окиси ниобия. Эти обогащенные кислородом нанослоистые частицы помещаются в полости углеродных наноматериалов (система $\text{ov-Nb}_2\text{O}_5/\text{CNS}$, ov – вакансии кислорода) [69].

Пример компьютерной программы для расчета защиты от ЭМИ излучения в сложных металлоорганических структурах приведен в [70]. Программа CASTEP считает зонную структуру и механические свойства с использованием функции Пердью – Бёрка – Эрнцерхофа (Perdew–Burke–Ernzerhof). Примером такого расчета является разработка стратегии инъекции носителей заряда для оптимизации диэлектрических свойств графена путем регулирования наноллистов железа в частице Fe/RGO.

1.5.3. Защитные радиочастотные пленки на основе оксидов металлов

Поиски альтернативных материалов для замены прозрачных электродов на основе ITO ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$) [71] отражают нарастающие требования производителей дисплеев, и, в частности, устройств прозрачной электроники. К настоящему времени выполнены широкие исследования слоев на основе оксидных материалов [72,73], ведутся работы по созданию коммерчески привлекательных низкзатратных технологий синтеза прозрачных электродов TCF (thin conductive film) на основе графена [74] и углеродных нанотрубок (см., например, [75]).

В разработке и производстве систем отображения информации сформировался новый приоритет по созданию приборов (смартфонов, телевизионных экранов) на гибких носителях [76]. Это неизбежно повлекло за собой ужесточение требований к разрабатываемым новым архитектурам и технологиям синтеза функциональных слоев. С учетом термической стойкости гибких полимерных материалов подложек температуры синтеза слоев не должны превышать 100–150 °C. Очевидно, что при этом должны быть сохранены электрические и оптические характеристики слоев, достигнутые ранее при более высоких температурах.

В последние годы особый интерес при разработках новых материалов для функциональных слоев прозрачной электроники «проявляется к аморфным материалам. Так, разработанный фирмой Sharp аморфный материал канала активноматричных транзисторных структур на основе системы IGZO (In-Ga-Zn-O) успешно используется многие годы в ЖК и OLED (органические светодиоды) панелях» [77].

«Дальнейшие работы по совершенствованию состава, структуры и технологии формирования материалов каналов МДП транзисторов привели к созданию нового материала IGZTO (In-Ga-Zn-Sn-O) с подвижностью до 65 $\text{см}^2/\text{В с}$ » [78].

«Поиски путей совершенствования характеристик прозрачных электродов для систем отображения информации привели к созданию нового класса функциональных покрытий на основе многослойных структур» [79]. Трехслойные

структуры оксид/металл/оксид на основе системы $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}/\text{Ag}/\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO/Ag/ITO), синтезируемые при температурах, не превышающих 50°C , находят практическое применение в OLED дисплеях, светоизлучающих структурах [79, 80].

«Активизируются попытки создания новых функциональных слоев для прозрачной электроники на основе сверхрешеток и многослойных структур «аморфный оксид/металл/аморфный оксид» с пространственно разнесенными областями с высокой концентрацией носителей заряда и областями с высокой подвижностью носителей» [81]. «В сочетании с использованием аморфных оксидных слоев данное направление представляется перспективным» [81].

Для защиты от ЭМИ перспективным является использование различных типов слоистых структур. Примерами таких структур являются сверхрешетки. «Теоретически исследовано внутриминизонное поглощение света электронами квантовой сверхрешетки в условиях квантующего электрического поля с учетом электрон-фононного взаимодействия. Основной вклад в рассеяние электронов дает взаимодействие с оптическими бездисперсионными фононами. Показано, что точка $\omega = \omega_0$ (ω – частота света, ω_0 – частота оптического фонона) условно разбивает зависимость коэффициента поглощения от ω на две части: $\omega < \omega_0$ – область “сильного” поглощения. Электрическое поле приводит к сдвигу области “сильного” поглощения в красную сторону спектра» [82]. Также рассмотрена возможность управления спектральным диапазоном поглощения ЭМИ.

Выводы к главе 1

На основании данных, приведенных в научных российских и международных журналах, описаниях патентов, в нормативных документах по использованию РЭА, актуальными являются следующие задачи по электромагнитному загрязнению от радиочастотных источников:

- измерение широкого комплекса параметров ЭМИ от различных источников и их комбинаций;

- разработка модели ЭМЗ от различных источников и их комбинаций;
- разработка технологии защитных фильтров. Особое внимание следует обратить на пленочные материалы на основе оксидов переходных металлов, уже использующихся в радиоэлектронной промышленности, а также на перспективные наноструктурированные материалы.

Глава 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Измерительные приборы

В ходе исследования оценивалось радиочастотное электромагнитное загрязнение, излучаемое ноутбуками, в сочетании с помехами, создаваемыми другими близлежащими источниками, такими как мобильные телефоны, Wi-Fi и микроволновые печи. Измерения проводились на расстоянии 1 метра от устройств. Использовались трехкоординатный измеритель напряженности радиочастотного поля TM-195 от TENMARS TEST & MEASUREMENT INSTRUMENTS (Рисунок 2.1а) и измеритель ЭДС EMF 829 для измерения напряженности низкочастотного электромагнитного поля (Рисунок 2.1б). Напряженность магнитного поля измерялась в радиочастотном диапазоне от 400 Гц до 3 ГГц. Точность определения основных параметров составляла до 0,1 мВ/м, 0,1 мкА/м, 0,001 мкВт/м².

Трехкоординатный измеритель напряженности радиочастотного поля TM-195 TENMARS. Производитель: Тайвань.

- метод измерения: цифровой, трехосевое измерение I;
- характеристика направления: изотропная, трехосевая;
- выбор диапазона измерений: один непрерывный диапазон;
- разрешение ЖК дисплея: 0,1 мВ/м, 0,1 мкА/м, 0,001 мкВт/м².

«Измеритель напряженности электромагнитного поля в высокочастотном диапазоне: 50 МГц – 3,5 ГГц:

– предназначен для измерения напряженности электромагнитного поля радиостанций и сотовых телефонов (CW, TDMA, GSM, DECT), базовых станций, беспроводных сетей (Wi-Fi), излучения от микроволновых устройств;

- диапазон измерения: 38 мВ/м – 20 В/м – TM-195;

- динамический диапазон: 75 дБ;

- встроенный трехмерный преобразователь обеспечивает измерение электромагнитного поля по трем осям (X, Y, Z);
- скорость измерения: 4 измерения в секунду» [41];
- прибор работает в режиме записи МАКСИМАЛЬНЫХ/СРЕДНИХ значений и удержания показаний;
- встроенная память на 200 измерений;
- время настройки: обычно 1,5 с (от 0 до 90% значения измерения);
- частота дискретизации: 1,5 раза в секунду;
- единицы измерения: мВ/м, В/м, мкА/м, мА/м, мкВт/м², мВт/м², мкВт/см²

EMF 829-измеритель напряженности поля по трем осям. Тестер электромагнитного поля EMF829 позволяет измерять характеристики электромагнитных волн. Встроенный в корпус внешний датчик ЭДС тестера может регистрировать интенсивное электромагнитное излучение, например, от линий электропередачи, трансформаторных ячеек и т.д. Диапазон измерения ЭДС тестера составляет от 0 до 9999 в желаемых единицах измерения.

Время срабатывания составляет 1 секунду.

Тестер электромагнитного поля работает в диапазоне частот от 50 МГц до 3,5 ГГц.

Для измерений можно использовать следующие единицы измерения: мВ/м, В/м, мкА/м, мА/м, мкВт/м², мВт/м², мкВт/см².

Показания отображаются на жидкокристаллическом экране. Прибор может вычислять максимальные и средние значения. Встроенная память прибора позволяет записывать 99 результатов измерений.

Вес прибора 450 г. Размеры 261×73×38 мм.



а



б

Рисунок 2.1 – Измерение напряженности: **а** – трехкоординатный измеритель напряженности радиочастотного поля TM-195 от TENMARS TEST & MEASUREMENT INSTRUMENTS; **б** – измеритель ЭДС EMF 829 для измерения напряженности низкочастотного электромагнитного поля

2.2. Описание экспериментов и выбор геометрии измерения

Эксперименты проводились в зоне портативного компьютера на расстоянии 36×25 см в верхних точках и 36×25 см в передних точках и в соответствии с Рисунками 2.2 и 2.3: 18 точек измерения, по 9 точек для каждой стороны, верхние точки измерения (от $topmp1$ до $topmp9$ и передние точки измерения от ($infmp1$ до $infmp9$), Рисунки 2.2 и 2.3.

Сценарий действий по измерениям:

2.1. Первый шаг – это плотность мощности в ($Вт/м^2$), которая представлена в виде одного источника из (от случая 1 до случая 4) согласно с Рисунком 2.2, затем через два источника из (случай до случая 11), и последний в терминах трех и четырех источников из (случаи с 12 по случай 15).

2.2. Второй компонент электрической напряженности в В/м мы повторяем шаг выше для всех случаев на Рисунке 2.2.

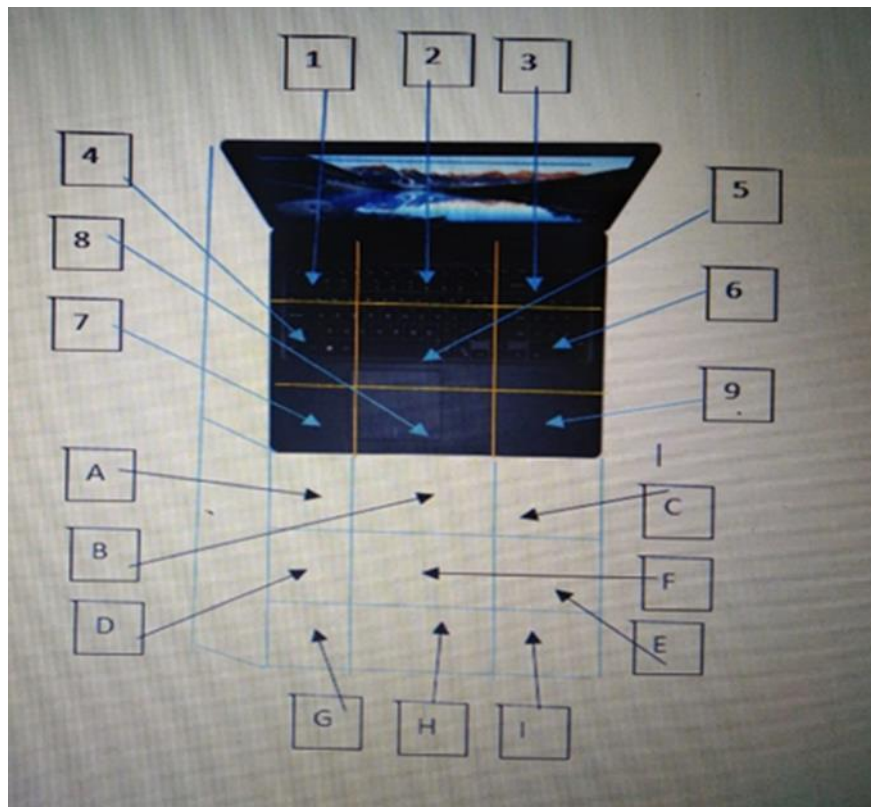


Рисунок 2.2 – Расположение 18 точек измерения уровня ЭМЗ, излучаемого ноутбуком, и его взаимодействия с тремя остальными источниками ЭМЗ вблизи него. Измерения выполнены для всех точек на уровне стола и на высоте 5 см, а также еще на высоте 10 см над ноутбуком

2.3. Третий компонент напряженность магнитного поля в А/м мы повторяем первый шаг для всех случаев.

Наша методика является развитием метода, описанного Дарко Бродичем в статье [11]. Он рассматривает уровень очень низкочастотного магнитного поля, генерируемого лабораторным оборудованием (tbmp1-tbmp9) и (bbmp1-bbmp9). Было измерено магнитное поле для низких частот в диапазоне 300 Гц. Его эксперимент состоял из исследования 10 различных портативных компьютеров в нормальном состоянии, работающих в обычном режиме и при большой нагрузке.

В [11] измерялось низкочастотное магнитное поле, генерируемое портативными компьютерами. Ноутбук состоит из электронных и электрических компонентов, соединенных в единую электрическую цепь. При нормальной работе ноутбуков эти компоненты запитываются электрическим током. Магнитное

поле возникает в результате протекания тока через эти компоненты. Согласно закону Био – Савара, магнитное поле B создается постоянным током I и описывается уравнением (2.1).

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \int_{wire} \frac{dl \cdot \hat{r}}{r^2}, \quad (2.1)$$

$$j\left(\frac{A}{m}\right) = \sum_{i=1}^{i=n} j_i. \quad (2.2)$$

Это поле определяет уровень радиочастотного электромагнитного загрязнения, создаваемого портативными компьютерами.

Эксперимент Бродича включал в себя измерения магнитного поля в 27 точках по соседству с ноутбуком. Схема расположения этих точек измерения показана на Рисунке 2.1. Точки измерения разделены на три группы (см. Рисунок 2.3 для справки).

В этой работе измеряется магнитное поле вблизи ноутбука. Предлагаются и обсуждаются результаты измерений. Затем они были сопоставлены с безопасными пределами электромагнитного поля, предложенными MPR II, TCO, ICNIRP, SMIEMSP (Министерством окружающей среды, горной промышленности и территориального планирования Сербии). Было показано, что некоторые ноутбуки излучают очень сильные магнитные поля. Поэтому их следует использовать с осторожностью.

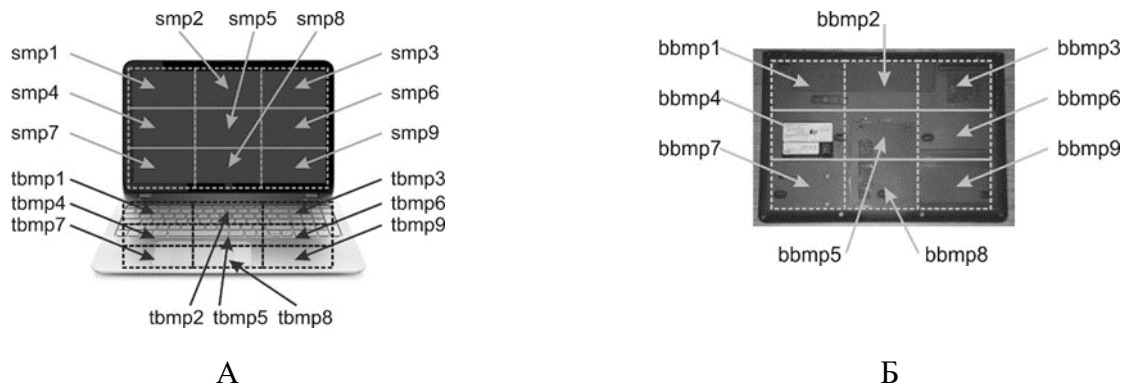


Рисунок 2.3 – Расположение точек для измерения электромагнитного излучения ноутбука с ЖК экраном

Примечание – А – над верхней частью переносного компьютера; Б – в нижней части ноутбука. smp (screen measuring point) – точка измерения на экране; tbmp (top measuring point) – точка измерения над ноутбуком; bbmp (bottom measuring point) – точка измерения под ноутбуком. Измеряется напряженность магнитного поля вблизи ноутбука [11]

Высоко оценивая подход Бродича, отметим недостатки его метода.

Во-первых, он не упомянул о влиянии других источников на ноутбук, хотя большую часть времени мы пользуемся ноутбуком по Wi-Fi, и у нас обычно есть с собой мобильный телефон. Более того, иногда мы делаем это, находясь на кухне, и это добавляет нам еще один источник излучения (микроволновая печь). Именно поэтому мы следовали его методике оценки электромагнитного загрязнения, вызванного многочисленными источниками радиоволн в зоне расположения ноутбука.

Во-вторых, он оценил электромагнитное загрязнение только для магнитного поля в микротеслах (μT). Но мы оценили три составляющие электромагнитного загрязнения: напряженность магнитного поля (мА/м), напряженность электрического поля (В/м) и плотность мощности (мВт/м^2).

В-третьих, он проводил эксперименты в области экрана и клавиатуры и использовал область только перед ноутбуком, поэтому мы должны оценить уровень ЭМЗ в области вокруг ноутбука.

Геометрия нашего эксперимента представлена на Рисунке 2.2. Мы провели наш эксперимент на следующих расстояниях: длина, ширина и высота ноутбука составили 25, 36 и 25 см. Площадь перед ЖК–дисплеем равна тем же значениям – 25, 36 и 25 см. Мы выполнили измерения для всех точек на высоте 5 см. В сценарии измерений мы разделили случаи на три группы. Первый: один источник, второй: два источника, третий: группа из трех и четырех источников. Затем мы сравнили составляющую напряженности магнитного поля ЕМРІ в (А/м) со стандартным значением, которое распознается ICNIRP. Измеренный индекс электромагнитного загрязнения (ЕМРІ) определяется как значения напряженности магнитного поля (А/м), состоящие из 15 различных значений (точки на Рисунке 2.2.). Он представляет собой индекс электромагнитного загрязнения, излучаемого LC, и взаимодействия с тремя другими источниками в его окрестностях для 18 точек (9 верхних измеренных точек – помечены как $topmp1 - topmp9$) и 9 точек в передней части (передняя измеренная точка – помечена как $infmp1 - infmp9$) окрестности LC. В сценарии измерений и анализа данных мы частично использовали методы Бродича [11]. С учетом измерения параметров ЭМЗ на разных высотах, полное количество точек измерения составляет 45.

Суммируем последовательность эксперимента. Во время эксперимента ноутбук 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.

Представленная методика развивает описанную в [11] за счет расширения пространства около оператора, использования большего количества источников ЭМЗ и, соответственно, большего количества возможных комбинаций этих источников. Ее основные компоненты описаны в наших публикациях [83–85].

2.3. Описание радиоэлектронных приборов как источников электромагнитного загрязнения

Приведем список технических параметров четырех видов источников ЭМЗ, излучающих электромагнитные волны в широком диапазоне радиочастот.

2.3.1. Портативный компьютер (лэптоп)

Портативный компьютер (LC) Lenovo ideapad 100–15IBD с процессором Intel ® core (TM) i3-5005u CPU@2.00GHz. В ходе эксперимента портативный компьютер был протестирован в обычном рабочем состоянии.

2.3.2. Мобильный телефон

Мобильный телефон Huawei Y7 Prime 2018 с частотой 1,4 ГГц + 1,1 ГГц + 1800 МГц

2.3.3. Wi-Fi 2300 МГц и Микроволновая печь

Микроволновая печь с частотой 2450 МГц, модельная серия ME81KRW-2. Внутреннее покрытие металл/стекло: биокерамика, диаметр поворотного стола 28,8 см, полезный объем 23 л, мощность микроволновой печи 800 Вт, потребляемая мощность источника питания 1150 Вт, масса 10,5 кг, габаритные размеры – высота 27,5 см, глубина 36 см, ширина 48,9 см.

Информация о методах получения фильтров для защиты от ЭМИ приведена в соответствующих разделах главы 4.

Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОТ МНОЖЕСТВА ИСТОЧНИКОВ

3.1. Модель электромагнитного загрязнения от множества источников

Результаты изложены в публикациях [84, 86, 87, 92].

На Рисунке 3.1 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. Целью данного исследования является оценка электромагнитного загрязнения, вызванного множеством источников, с целью смягчения будущих проблем со здоровьем, возникающих в результате небрежного отношения к источникам электромагнитного загрязнения.

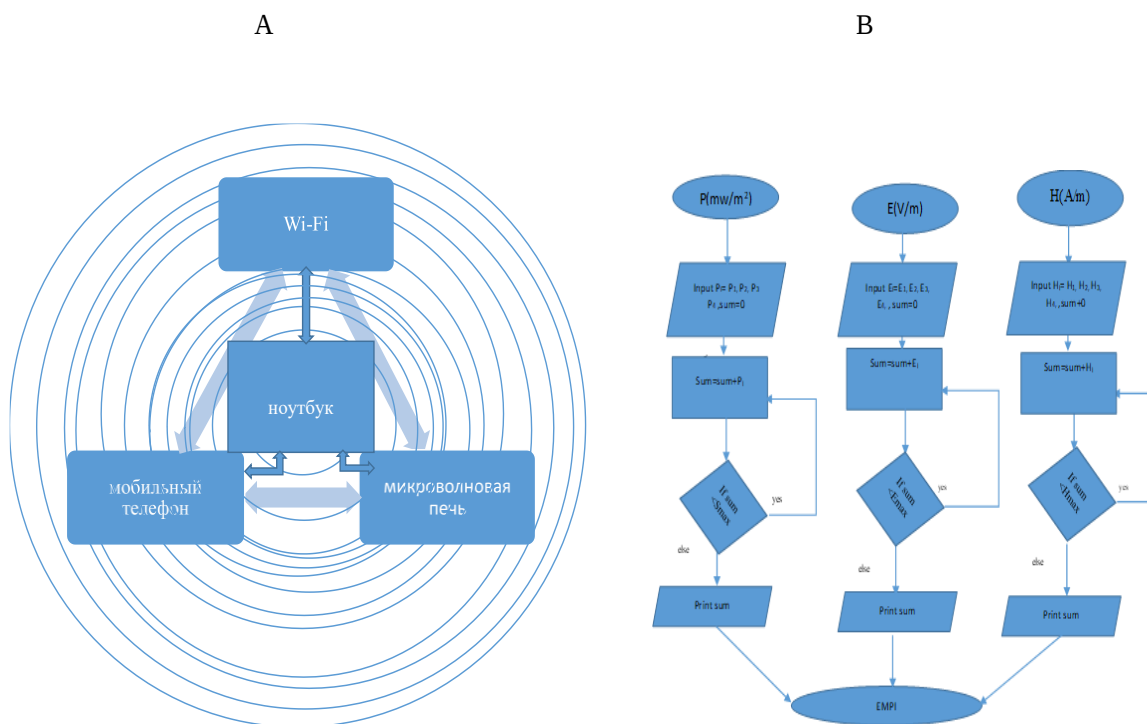


Рисунок 3.1. – Модель электромагнитного загрязнения. Слева – модель А. Множество источников РЧ излучения одновременно работают на одной и той же площади, приводя к сложному характеру ЭМЗ. Справа – модель В. Алгоритм модель сбора разных параметров ЭМИ нескольких РЧ источников, работающих одновременно в одном и том же месте около ноутбука

Рассмотрим математическую модель интенсивности электромагнитного загрязнения ЕМРІ около различных радиоэлектронных приборов. Начнем с пространства вокруг ноутбуков. Оценим площадь ноутбука в зоне загрязнения и рассчитаем значение ЕМРІ в Ватт-часах из уравнения:

$$EMPI = \left(\frac{1}{A}\right) (\Sigma ai) (\Sigma \int_0^T pi(t) dt), \quad (3.1)$$

где A – область ячейки (пространства или площади около приборов);

ai – площадь пакета загрязнения POP (packet of pollution) от каждого источника-излучателя;

P_i – измеряемая мощность;

T – период времени, например, 24 часа [33].

Для максимального расстояния и минимального сигнала мощности ЭМИ длиной волны λ :

$$P = P_{min} R^2_{max} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right), \quad (3.2)$$

Тогда, подставляя выражение (3.2) в уравнение (3.1), получим

$$EMPI = \left(\frac{\Sigma ai}{A}\right) = \Sigma \int_0^T P_{min} R^2_{max} \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) dt. \quad (3.3)$$

Теперь у нас есть сумма всех источников-излучателей в ячейке. Но нам может понадобиться суммирование всех источников-излучателей. Определим это как пакет загрязнения POP (packet of pollution).

$$EMPI = \left(\frac{\text{сумма всех } POP}{\text{Площадь ячейки}} \right). \quad (3.4)$$

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

В Таблице 3.1 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.

Таблица 3.1

Источники	V_m (измеренный)	V_c (расчитанный)	Расхождение ($V_m \cdot V_c / V_m$)	H_m (измеренный)	H_c (расчитанный)	Расхождение ($H_m - H_c / H_m$)	$P_m = V_m \cdot H_m$	$P_c = H_c \cdot V_c$	Расхождение ($P_m - P_c / P_m$)
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. 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	$H = \sqrt{\sum \pm H_i^2}$				

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/м²). 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 3.1. 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 (В/м), напряженность магнитного поля (А/м), мощность излучения (Вт/м²). Для каждой пары экспериментального и рассчитанного значения указано относительное расхождение этих величин.

Данные Таблицы 3.1 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.

На Рисунок 3.2, 3.3. и 3.4 приведены максимальные, минимальные и средние измеренные значения плотности излученной мощности, напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля для электромагнитного загрязнения от разных источников и их комбинаций, полученные при разных режимах работы.

Аналогичные комплексы измерений были выполнены и для двух других параметров ЭМИ. В Таблицах 3.1, 3.3, 3.4 и на Рисунках 3.2–3.4 приведены

максимальные, минимальные и средние измеренные значения напряженности электрического и магнитного поля для электромагнитного загрязнения от разных источников и их комбинаций.

Таблица 3.2 – Измеренные и рассчитанные значения плотности излученной мощности для электромагнитного загрязнения от нескольких источников и их сравнение с электромагнитным загрязнением в случае одного источника или их комбинаций (столбец 7)

случай	Источник (Вт/м ²)	Измеренные значения			Сравнение	Примечания
		макс.	ср.	мин.		
1	(1) мобильный телефон 115,027 (макс) 3,993 (ср) 1,253 (мин) Здесь и далее первое число относится к максимальной измеренной мощности излучения, второе – к средней, третье – к минимальной мощности	117,56	39,232	11,756	Случай 1 с 5	$P_1 < P_5$
		29,92	4,115	0,184	Случай 1 с 8	$P_1 > P_8$, кроме ср,
		1,617	0,879	0,524	Случай 1 с 10	$P_1 > P_{10}$
		81,71	12,233	2,138	Случай 1 с 11	$P_1 < P_{11}$, кроме макс.
		1,654	0,493	0,257	Случай 1 с 12	$P_1 > P_{12}$,
		1,637	0,635	0,200	Случай 1 с 14	$P_1 > P_{14}$
		1,528	0,483	0,213	Случай 1 с 15	$P_1 > P_{15}$
2	(2) ноутбук 20,002 4,379 0,220	5,998	0,783	0,572	Случай 2 с 6	$P_2 > P_6$, кроме мин.
		29,92	4,115	0,184	Случай 2 с 8	$P_2 > P_8$, кроме макс
		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	$P_2 > P_{15}$
3	(3) Wi-Fi 2,869 1,237 0,126	117,56	39,232	11,756	Случай 3 с 5	$P_3 < P_5$
		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
4	(4) микроволновая печь 1,963 0,683 0,211	1,639	0,728	0,429	Случай 4 с 7	$P_4 < P_7$, кроме макс
		0,963	0,500	0,251	Случай 4 с 9	$P_4 > P_9$, кроме мин
		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
5	(1+3) 117,56 39,272 11,456	68,706	12,233	2,138	Случай 5 с 11	$P_5 > P_{11}$
		1,118	0,635	0,200	Случай 5 с 14	$P_5 > P_{14}$
		1,013	0,483	0,213	Случай 4 с 15	$P_5 > P_{15}$
6	(2+3) 5,998 1,732 0,572	68,706	12,233	2,138	Случай 6 с 11	$P_6 < P_{11}$
		0,896	0,495	0,260	Случай 6 с 13	$P_6 > P_{13}$
		1,528	0,483	0,213	Случай 6 с 15	$P_6 > P_{15}$
7	(3+4) 1,69 0,728 0,429	1,587	0,495	0,260	Случай 7 с 13	$P_7 > P_{13}$
		1,637	0,635	0,200	Случай 7 с 14	$P_7 > P_{14}$
		1,528	0,483	0,213	Случай 7 с 15	$P_7 > P_{15}$
8	(1+2) 29,92 4,115 0,184	81,71	12,233	2,138	Случай 8 с 11	$P_8 < P_{11}$
		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	$P_8 > P_{15}$
9	(2+4) 1,783 0,500 0,251	1,654	0,493	0,257	Случай 9 с 12	$P_9 > P_{12}$, кроме мин
		1,587	0,495	0,260	Случай 9 с 13	$P_9 > P_{13}$, кроме мин
		1,528	0,483	0,213	Случай 9 с 15	$P_9 > P_{15}$
10	(1+4) 1,617 0,879 0,524	1,587	0,493	0,257	Случай 10 с 12	$P_{10} > P_{12}$, кроме мин
		1,637	0,635	0,200	Случай 10 с 14	$P_{10} > P_{14}$, кроме макс
		1,528	0,483	0,213	Случай 10 с 15	$P_{10} > P_{15}$
11	(1+2+3). 81,71 12,233 2,138	1,528	0,483	0,213	Случай 11 с 15	$P_{11} > P_{15}$
12	(1+2+4). 1,654 0,493 0,257	1,528	0,483	0,213	Случай 12 с 15	$P_{12} > P_{15}$, кроме макс
13	(2+3+4). 1,587 0,495 0,260	1,528	0,483	0,213	Случай 13 с 15	$P_{13} > P_{15}$, кроме макс
14	(1+3+4). 1,637 0,635 0,200	1,528	0,483	0,213	Случай 14 с 15	$P_{14} > P_{15}$, кроме мин
15	(1+2+3+4)	1,528	0,483	0,213		

3.2. Параметры электромагнитного загрязнения от разных источников и их комбинаций, полученные при разных режимах работы

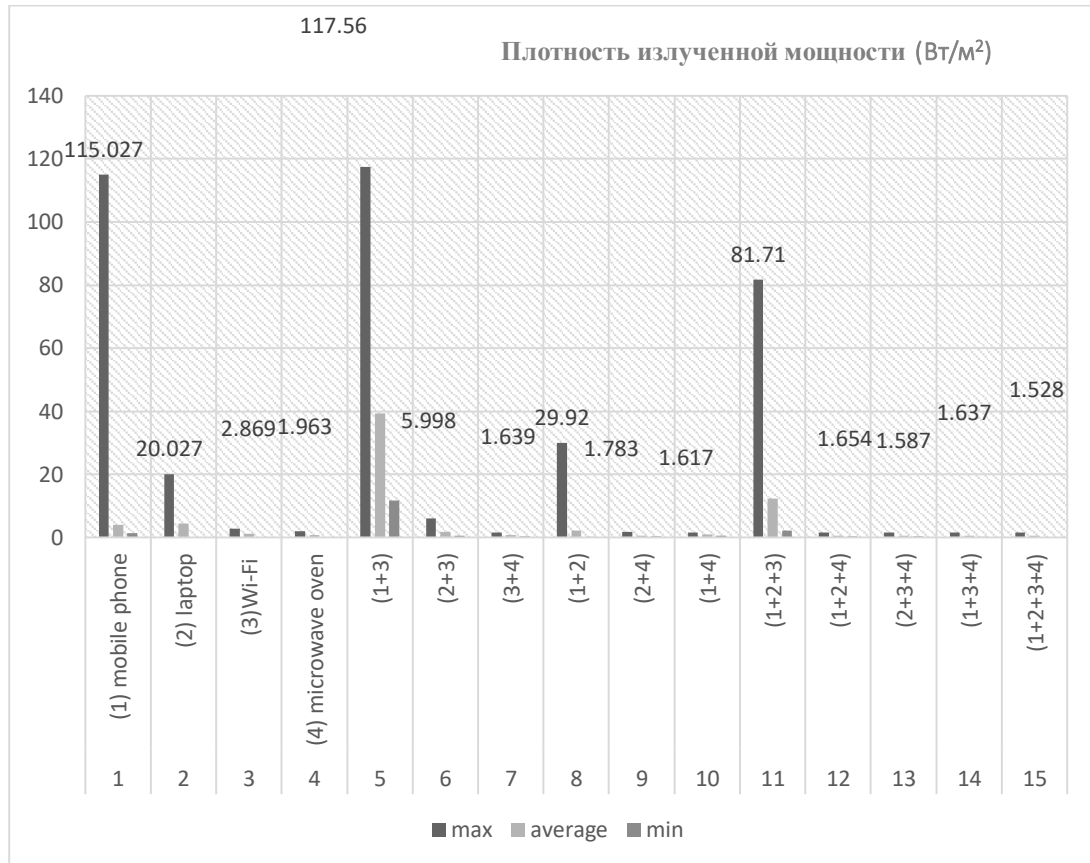


Рисунок 3.2 – Измеренные значения плотности излученной мощности для электромагнитного загрязнения от разных источников и их комбинаций. Каждая комбинация содержит три столбца: левый – максимальное, средний – среднее, правый – минимальное значение параметра

На Рисунке 3.3 представлены измеренные значения напряженности электрического поля (В/м).

В Таблице 3.3 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 Таблица 3.3 дает сравнение всех возможных случаев ЭМЗ, исследованных в работе, по мощности ЭМИ.

Таблица 3.3

№	Источник (В/м)	Измеренные значения			Измеренные значения	Измеренные значения
		макс.	макс.	макс.		
1	(1) мобильный телефон 6,698 1,704 0,821	6,78	4,236	2,43	Случай 1 с 5	$E_1 < E_5$,
		2,4396	0,892	0,304	Случай 1 с 8	$E_1 > E_8$,
		32,39	22,671	17,19	Случай 1 с 10	$E_1 < E_{10}$,
		5,534	2,249	1,154	Случай 1 с 11	$E_1 < E_{11}$,
		23,534	16,532	11,54	Случай 1 с 12	$E_1 < E_8$
		25,962	18,547	9,638	Случай 1 с 14	$E_1 < E_{14}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 1 с 15	$E_1 < E_{15}$,
2	(2) ноутбук 2,846 0,807 0,299	1,534	0,99	0,568	Случай 2 с 6	$E_2 < E_6$, кроме макс
		2,4396	0,892	0,304	Случай 2 с 8	$E_2 < E_8$, кроме макс
		24,086	16,446	11,458	Случай 2 с 9	$E_2 < E_9$,
		5,534	2,249	1,154	Случай 2 с 11	$E_2 < E_{11}$,
		23,534	16,532	11,54	Случай 2 с 12	$E_2 < E_{12}$,
		23,932	6,442	11,94	Случай 2 с 13	$E_2 < E_{13}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 2 с 15	$E_2 < E_{15}$,
3	(3) Wi-Fi 1,335 0,765 0,27	6,78	4,236	2,43	Случай 3 с 5	$E_3 < E_5$,
		1,534	0,99	0,568	Случай 3 с 6	$E_3 < E_6$,
		25,666	20,297	15,424	Случай 3 с 7	$E_3 < E_7$,
		5,534	2,249	1,154	Случай 3 с 11	$E_3 < E_{11}$,
		23,932	16,442	11,94	Случай 3 с 13	$E_3 < E_{13}$
		25,962	18,547	9,638	Случай 3 с 14	$E_3 < E_{14}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 3 с 15	$E_3 < E_{15}$,
4	(4) микроволновая печь 27,03 13,891 6,25	25,666	20,297	15,424	Случай 4 с 7	$E_4 < E_7$,
		24,086	16,446	11,458	Случай 4 с 9	$E_4 < E_9$,
		32,39	22,671	17,19	Случай 4 с 10	$E_4 < E_{10}$,
		23,534	16,532	11,54	Случай 4 с 12	$E_4 < E_{12}$,
		11,54	16,442	11,94	Случай 4 с 13	$E_4 < E_{13}$,

		25,962	18,547	9,638	Случай 4 с 14	$E_4 < E_{14}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 4 с 15	$E_4 < E_{15}$,
5	(1+3) 6,78 4,236 2,43	5,534	2,249	1,154	Случай 5 с 11	$E_5 > E_{11}$,
		25,962	18,547	9,638	Случай 5 с 14	$E_5 < E_{14}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 4 с 15	$E_5 < E_{15}$,
6	(2+3) 1,534 0,99 0,568	5,534	2,249	1,154	Случай 6 с 11	$E_6 < E_{11}$,
		11,54	16,442	11,94	Случай 6 с 13	$E_6 < E_{13}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 6 с 15	$E_6 < E_{15}$,
7	(3+4) 25,666 20,297 15,424	11,54	16,442	11,94	Случай 7 с 13	$E_7 > E_{13}$,
		25,962	18,547	9,638	Случай 7 с 14	$E_7 < E_{14}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 7 с 15	$E_7 < E_{15}$,
8	(1+2) 3,51 0,892 0,304	5,534	2,249	1,154	Случай 8 с 11	$E_8 < E_{11}$,
		23,534	16,532	11,54	Случай 8 с 12	$E_8 < E_{12}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 8 с 15	$E_8 < E_{15}$,
9	(2+4) 26,86 16,446 11,458	23,534	16,532	11,54	Случай 9 с 12	$E_9 < E_{12}$, кроме макс
		11,54	16,442	11,94	Случай 9 с 13	$E_9 > E_{13}$, кроме мин
		25,658	16,016	10,136	Случай 9 с 15	$E_9 > E_{15}$,
10	(1+4) 30,39 22,671 17,19	23,534	16,532	11,54	Случай 10 с 12	$E_{10} > E_{12}$,
		25,962	18,547	9,638	Случай 10 с 14	$E_{10} > E_{14}$,
		25,658	16,016	10,136	Случай 10 с 15	$E_{10} > E_{15}$,
11	(1+2+3). 5,534 2,249 1,154	25,658	16,016	10,136	Случай 11 с 15	$E_{11} < E_{15}$,
12	(1+2+4). 25,67 16,532 10,54	25,658	16,016	10,136	Случай 12 с 15	$E_{12} > E_{15}$, кроме макс
13	(2+3+4). 25,932 16,442 11,94	25,658	16,016	10,136	Случай 13 с 15	$E_{13} > E_{15}$, кроме макс
14	(1+3+4). 25,962 18,547 9,638				Случай 14 с 15	$E_{14} > E_{15}$, кроме мин
15	(1+2+3+4)	25,658	16,016	10,136	Случай 15 с 15	

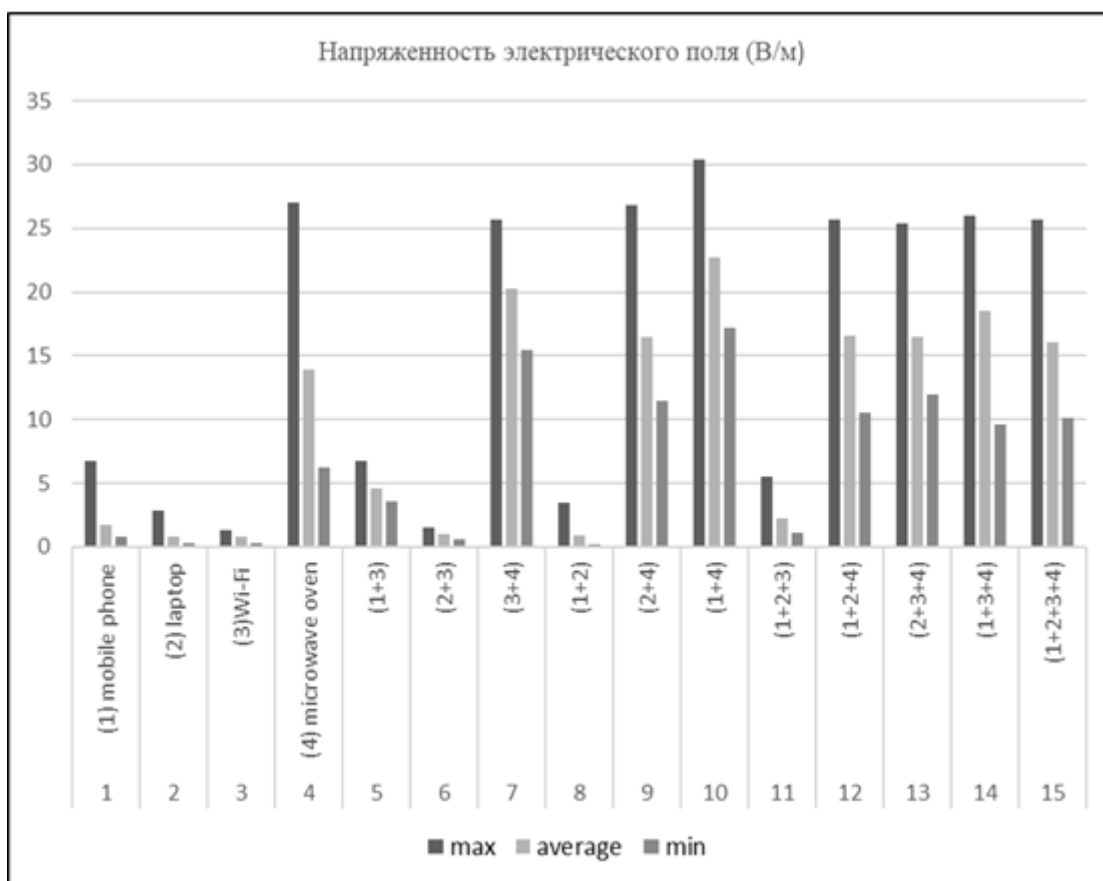


Рисунок 3.3 – Измеренные значения напряженности электрического поля (В/м) излучения от разных источников и их комбинаций. Каждая комбинация содержит три столбца: левый – максимальное, средний – среднее, правый – минимальное значение параметра

В Таблице 3.3 и на Рисунке 3.3. измеренные значения напряженности электрического поля (В/м) представлены как максимальные, средние и минимальные значения для электромагнитного загрязнения от нескольких источников в качестве совместной основы и сравниваются с электромагнитным загрязнением в случае одного источника, как показано в столбце № 7, где мы сравниваем случай 1 со случаями (5, 8, 10, 11, 12, 14, 15). Поскольку мы используем значение 1 по умолчанию, оно может соответствовать этим случаям. поэтому нам нужно знать, в каком случае мы имеем наибольшее электромагнитное загрязнение.

Таблица напряженности электрического поля (В/м) показывает, как соотносится электромагнитное загрязнение с (В/м). Мы начинаем сравнение с

разделения таблицы на 6 групп, обозначенные цветами, от группы 1 до группы 6. Таким образом, переходы от группы 1 к группе 4 представляют собой сравнение одного источника со всеми источниками в его семейной группе ЭМИ.

1. Группа 1 представляет собой сравнение между источником 1 (мобильный телефон) и приведенным в Таблице 3.3. источником, который имеет значения электрической напряженности 6,698 1,704 0,821 (В/м) для максимального, среднего и минимального значений соответственно. Но когда один источник находится рядом с другим источником или подключен к нему, мы обнаруживаем, что значения электрической напряженности в (В/м) увеличиваются, как показывает сравнительная Таблица 3.3. для этих случаев (5, 10, 11, 12, 14, 15), потому что это случаи, частью которых является источник 1.

2. Группа 2 представляет собой сравнение между источником 2 (ноутбук) и приведенным в Таблице 3.3. источником, который имеет значения электрической напряженности 2,846 0,807 0,299 (В/м) для максимального, среднего и минимального значений соответственно. Но когда мы сравниваем случай 2 с другими источниками, в связи с тем, что источник 2 может находиться рядом с другим источником в группе или подключен к нему, мы обнаруживаем, что все значения электрической напряженности в (В/м) увеличиваются, как показывает сравнительная Таблица 3.3. для этих случаев (9, 11, 12, 13, 15), а также мы получаем высокое максимальное значение в случае 6&8 напряженности электрического поля (В/м).

3. Группа 3 представляет собой сравнение источника 3 (Wi-Fi) со всеми случаями (5, 6, 7, 11, 13, 14, 15), частью которых является источник 3. Из Таблицы 3.3 и Рисунка 3.3. мы видим, что источник 3 (Wi-Fi) и указанный в Таблице 3.3. источник имеют значения электрической напряженности 1,335 0,765 0,27 (В/м) для максимального, среднего и минимального значений соответственно. Но, когда мы сравниваем случай 3 с другими источниками, в связи с тем, что источник 3 может находиться рядом с другим источником в группе или подключен к нему, мы обнаруживаем, что все значения электрической напряженности в (В/м)

увеличиваются, как показывает сравнительная Таблица 3.3 для этих случаев (5,6,7, 11, 13, 14, 15).

4. Группа 4 представляет собой сравнение источника 4 (микроволновая печь) со всеми случаями (7, 9, 10, 12, 13, 14, 15), частью которых является источник 4. – Из Таблицы 3.3. и Рисунка 3.3 мы видим, что источник 4 (микроволновая печь) и указанный в Таблице 3.3. источник имеют значения электрической интенсивности 27,03 13,891 6,25 (В/м) для максимального, среднего и минимального значений соответственно. Но когда мы сравниваем случай 4 с другими источниками, учитывая, что источник 4 находится рядом с другим источником, входящим в группу, мы обнаруживаем, что все значения электрической напряженности в (В/м) увеличиваются, как показано в сравнительной Таблице 3.2. для случаев 10 (1,4), когда мобильный телефон находится рядом с микроволновой печью, и мы получаем увеличение в среднем и минимальном количестве случаев (7, 9, 10, 12, 13, 14, 15).

5. Группа 5 представляет собой сравнение двух источников со всеми источниками в семейной группе ЕМР. Из Таблицы 3.3 и Рисунка 3.3 мы видим, что значения электрической напряженности в (В/м) увеличивались в следующих случаях:

- три исходных случая 14 и 15 имеют значение, превышающее значение двух исходных случаев 5;
- три исходных случая 11, 13 и 15 имеют значение, превышающее значение двух исходных случаев 6;
- три исходных случая 14 и 15 имеют значение, превышающее значение двух исходных случаев 7;
- три исходных случая 11, 12, 13 и 15 имеют значение, превышающее значение двух исходных случаев 8;

- три исходных случая 12, средний и минимальный, имеют значение, которое больше, чем два исходных случая 9, и 15 имеют значение, которое больше, чем два исходных случая 9;

- два исходных случая 10 имеют значение, которое больше, чем три исходных случая 12, 14 и 15.

6. Группа 6 представляет собой сравнение значений электрической напряженности в (В/м) между тремя источниками, причем все источники относятся к семейной группе ЭМИ:

- четыре исходных случая 15 имеют значения, которые больше, чем три исходных случая 11;

- четыре исходных случая 15 имеют значения, близкие к значению три исходных случая 12 и 13.

Таблица 3.4 – Измеренные и рассчитанные значения напряженности магнитного поля (А/м) излучения от нескольких источников и их сравнение с электромагнитным загрязнением в случае одного источника или их комбинаций (столбец 7)

№	Источник (А/м)	Измеренные значения			Сравнение	Примечания
		макс.	ср.	мин.		
1	(1) мобильный телефон 17,77 (макс) 4,951 (ср) 1,459(мин) Здесь и далее первое число относится к максимальной измеренной напряженности магнитного поля излучения, второе – к средней, третье – к минимальной напряженности магнитного поля	17,99	11,01	6,46	Случай 1 с 5	$H_1 < H_5$
		9,31	2,363	0,561	Случай 1 с 8	$H_1 > H_8$
		68,15	57,93	6,00	Случай 1 с 10	$H_1 < H_{10}$
		14,996	5,769	1,542	Случай 1 с 11	$H_1 < H_{11}$
		68,1	43,767	27,854	Случай 1 с 12	$H_1 < H_{12}$
		68,87	49,195	25,562	Случай 1 с 14	$H_1 < H_{14}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 1 с 15	$H_1 < H_{15}$
2	(2) ноутбук 7,397 2,230 0,886	4,069	2,42	1,699	Случай 2 с 6	$H_2 < H_6$, кроме макс
		9,31	2,363	0,561	Случай 2 с 8	$H_2 < H_8$, кроме мин
		67,92	33,037	11,14	Случай 2 с 9	$H_2 < H_9$
		14,996	5,769	1,542	Случай 2 с 11	$H_2 < H_{11}$
		68,1	43,767	27,854	Случай 2 с 12	$H_2 < H_{12}$
		67,26	38,112	11,64	Случай 2 с 13	$H_2 < H_{13}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 2 с 15	$H_2 < H_{15}$
3	(3) Wi-Fi 2,071 1,92 0,717	17,99	16,64	13,46	Случай 3 с 5	$H_3 < H_5$
		4,069	2,42	1,699	Случай 3 с 6	$H_3 < H_6$
		68,376	53,984	40,914	Случай 3 с 7	$H_3 < H_7$
		14,996	5,769	1,542	Случай 3 с 11	$H_3 < H_{11}$
		67,26	38,112	11,64	Случай 3 с 13	$H_3 < H_{13}$
		68,87	49,195	25,562	Случай 3 с 14	$H_3 < H_{14}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 3 с 15	$H_3 < H_{15}$
4	(4) микроволновая печь 72,68 48,795 29,85	68,376	53,984	40,914	Случай 4 с 7	$H_4 < H_7$, кроме макс
		67,92	33,037	11,14	Случай 4 с 9	$H_4 > H_9$
		68,15	57,93	6,00	Случай 4 с 10	$H_4 > H_{10}$, кроме ср.

		68,1	43,767	27,854	Случай 4 с 12	$H_4 > H_{12}$
		67,26	38,112	11,64	Случай 4 с 13	$H_4 > H_{13}$
		68,87	49,195	25,562	Случай 4 с 14	$H_4 > H_{14}$, кроме ср.
		69,184	41,818	23,273	Случай 4 с 15	$H_4 > H_{15}$
5	(1+3) 17,99 11,01 6,46	14,996	5,769	1,542	Случай 5 с 11	$H_5 > H_{11}$
		68,87	49,195	25,562	Случай 5 с 14	$H_5 < H_{14}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 5 с 15	$H_5 < H_{15}$
6	(2+3) 4,069 2,42 1,507	14,996	5,769	1,542	Случай 6 с 11	$H_6 < H_{11}$
		67,26	38,112	11,64	Случай 6 с 13	$H_6 < H_{13}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 6 с 15	$H_6 < H_{15}$
7	(3+4) 68,376 53,984 40,914	67,26	38,112	11,64	Случай 7 с 13	$H_7 > H_{13}$
		68,87	49,195	25,562	Случай 7 с 14	$H_7 > H_{14}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 7 с 15	$H_7 > H_{15}$, кроме макс
8	(1+2) 9,31 2,363 0,561	14,996	5,769	1,542	Случай 8 с 11	$H_8 < H_{11}$
		68,1	43,767	27,854	Случай 8 с 12	$H_8 < H_{12}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 8 с 15	$H_8 < H_{15}$
9	(2+4) 67,92 33,037 11,14	68,1	43,767	30,594	Случай 9 с 12	$H_9 < H_{12}$
		67,26	38,112	11,64	Случай 9 с 13	$H_9 < H_{13}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 9 с 15	$H_9 < H_{15}$
10	(1+4) 68,15 57,93 6,00	68,1	43,767	27,854	Случай 10 с 12	$H_{10} > H_{12}$
		68,87	49,195	25,562	Случай 10 с 14	$H_{10} > H_{14}$
		69,184	41,818	23,273	Случай 10 с 15	$H_{10} > H_{15}$
11	(1+2+3). 14,996 5,769 1,542	69,184	41,818	23,273	Случай 11 с 15	$H_1 < H_{15}$
12	(1+2+4). 68,1 43,767 27,85	69,184	41,818	23,273	Случай 12 с 15	$H_{12} > H_{15}$, кроме макс
13	(2+3+4). 67,26 38,112 11,64	69,184	41,818	23,273	Случай 13 с 15	$H_{13} < H_{15}$
14	(1+3+4)	68,87	49,195	25,562	Случай 14 с 15	$H_{14} > H_{15}$, кроме макс
15	(1+2+3+4)	69,184	41,818	23,273	Случай 15 с 15	

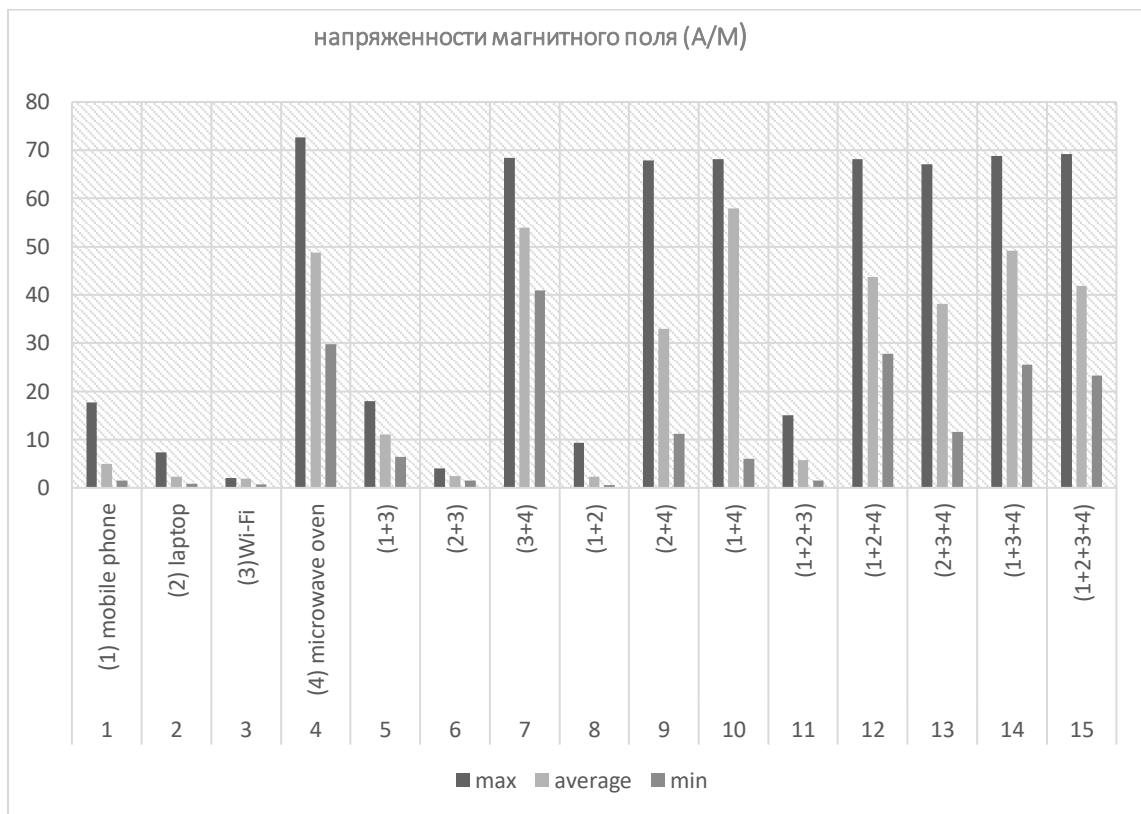


Рисунок 3.4 – Измеренные значения напряженности магнитного поля (А/м) излучения от разных источников и их комбинаций. Каждая комбинация содержит три столбца: левый – максимальное, средний – среднее, правый – минимальное значение параметра

Если обратиться к сравнительной Таблице 3.4 и Рисунку 3.4, мы обнаружим, что иногда значения из нескольких источников превышают значение, если бы мы сравнили его с одним источником, тогда это соотношение увеличивалось бы с увеличением количества источников загрязнения, как мы показали в Таблице сравнения, за исключением нескольких случаев, о которых мы упоминаем ниже:

Напряженность магнитного поля (А/м), приведенная в таблице, показывает, как соотносится электромагнитное загрязнение с (А/м). Мы начинаем сравнение с разделения таблицы на группы, обозначенные цветами, от группы 1 до группы 6. Таким образом, переход от группы 1 к группе 4 представляет собой сравнение одного источника со всеми источниками в его семейной группе ЭМИ.

1. Группа 1 представляет собой сравнение между источником 1 (мобильный телефон) и источником, указанным в Таблице 4. Он имеет значения электрической

интенсивности 17,77 4,951 1,459 (А/м) для максимального, среднего и минимального значений соответственно.

1.1. Но когда один источник находится рядом с другим источником или подключен к нему, мы обнаруживаем, что напряженность магнитного поля (А/м) увеличивается, как показывает сравнительная Таблица 3.4. для этих случаев (двух, трех и четырех источников) (5, 10, 12, 14, 15), потому что эти случаи, частью которых является источник 1.

1.2. Среднее и минимальное значение из трех исходных случаев 11 больше, чем из одного исходного 1.

2. Группа 2 представляет собой сравнение между источником 2 (ноутбук) и приведенным в Таблице 3.4. источником, который имеет значения напряженности магнитного поля 7,397 2,230 0,886 (А/м) для максимального, среднего и минимального значений, соответственно.

2.1. Но когда мы сравниваем случай 2 с другими источниками, поскольку источник 2 находится рядом с другим источником в группе или подключен к нему, мы обнаруживаем, что все значения электрической напряженности в (А/м) увеличиваются, как показывает сравнительная Таблица 3.4. для этих случаев (8,9, 11, 12, 13, 15), а также мы получаем высокое максимальное значение в случае 6 и .8 плотности тока (А/м).

2.2. Средний и минимальный случай на 6 больше, чем на один исходный случай 2.

3. Группа 3 представляет собой сравнение источника 3 (Wi-Fi) со всеми этими случаями (5, 6, 7, 11, 13, 14, 15), это случаи, частью которых является источник 3.

3.1. Из Таблицы 3.4 и Рисунка 3.4 мы видим, что источник 3 (Wi-Fi) и указанный в Таблице 3.4 источник имеют значения плотности тока (А/м) 1,335 0,765 0,27 для максимального, среднего и минимального значений соответственно.

Но когда мы сравниваем случай 3 с другими источниками, поскольку источник 3 может находиться рядом с другим источником в группе или подключен к нему, мы обнаруживаем, что плотность тока (А/м) увеличивается, как показывает сравнительная Таблица 3.4 для этих случаев (5,6,7, 11, 13, 14, 15).

4. Группа 4 представляет собой сравнение источника 4 (микроволновая печь) со всеми этими случаями. (7, 9, 10, 12, 13, 14, 15), это те случаи, частью которых является источник 4.

4.1. Из Таблицы 3.4. и Рисунка 3.4 мы видим, что источник 4 (микроволновая печь) и указанный в Таблице 3.4. источник имеют значения напряженности магнитного поля (А/м), равные 72,68, 48,795 и 29,85 для максимального, среднего и минимального значений соответственно.

4.2. Но, когда мы сравниваем случай 4 с другими источниками, поскольку источник 4 находится рядом с другим источником, входящим в группу, мы обнаруживаем, что наблюдается увеличение напряженности магнитного поля (А/м), поскольку сравнительная Таблица 3.4 показывает нам, что средние значения в случаях 10 и 14 больше, чем в случае с одним источником 4.

5. Группа 5 представляет собой сравнение двух источников, все источники которых входят в группу семейства ЭМИ. Из Таблицы 3.4 и Рисунка 3.4 мы видим, что напряженность магнитного поля (А/м), увеличенная в случаях, приведенных ниже:

5.1. Три исходных случая 14 и 15 имеют значение, превышающее значение двух исходных случаев 5.

5.2. Три исходных случая 11, 13 и 15 имеют значение, превышающее значение двух исходных случаев 6.

5.3. Максимальное значение в трех исходных случаях 14 и 15 больше, чем в двух исходных случаях 7.

5.4. Значение в трех исходных случаях 11, 12 и 15 больше, чем в двух исходных случаях 8.

5.5. Три исходных варианта 12, 13 и 15 имеют значение, которое больше, чем два исходных варианта 9.

5.6. Максимальное и минимальное значения трех исходных вариантов 12, 14 и 15 имеют значение, которое больше, чем два исходных варианта 10.

6. Группа 6 представляет собой сравнительную плотность тока (А/м), значения между тремя источниками, причем все источники относятся к группе семейства ЭМИ.

6.1. Значения в четырех случаях из 15 источников больше, чем в трех случаях из 12 и 13 источников.

6.2. Максимальное значение в четырех случаях из 15 источников имеет значения, близкие к значению из трех источников в случаях из 11 и 13.

Однако средние значения в случае нескольких источников также увеличились, если сравнить их с показателями в случае одного источника, что указывает на наличие очевидных электромагнитных помех от нескольких источников.

Наглядное представление всех 15 комбинаций с учетом количества источников ЭМИ в каждой дано в Таблице 3.5.

Прокомментируем полученные данные, обращая 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-м 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).

Таблица 3.5 – Параметры ЭМИ с учетом количества источников ЭМИ в каждой комбинации

Источник ЭМИ	Один			Два			Три и четыре		
	H, A/m	E, V/m	P, W/m ²	H, A/m	E, V/m	P, W/m ²	H, A/m	E, V/m	P, W/m ²
Мобильный телефон	17,77	6,697	115,027						
Ноутбук	7,397	2,846	20,027						
Wi-Fi	2,071	1,335	2,8691						
Микроволновая печь	72,68	27,03	1,963						
(1 & 3)	Мобильный телефон присоединен через Wi-Fi			17,99	6,78	117,56			
(2 & 3)	Ноутбук присоединен через Wi-Fi			4,069	1,534	5,998			
(3 & 4)	Микроволновая печь в зоне действия Wi-Fi			68,376	25,666	1,639			
(1 & 2)	Мобильный телефон около ноутбука			9,31	3,51	29,92			
(2 & 3)	Мобильный телефон присоединен через Wi-Fi			67,92	26,86	1,783			
(2 & 4)	Ноутбук в зоне действия микроволновой печи			68,15	30,39	1,617			
(1, 2 & 3)	Мобильный телефон и ноутбук присоединен через Wi-Fi						14,996	5,534	81,71
(1, 2 & 4)	Мобильный телефон и ноутбук находятся около микроволновой печи						68,1	25,67	1,654
(2, 3 & 4)	Ноутбук присоединен к Wi-Fi и находится около микроволновой печи						67,06	25,36	1,587
(1, 3 & 4)	Мобильный телефон присоединен через Wi-Fi и находится около микроволновой печи						68,87	25,96	1,637
(1, 2, 3 & 4)	Все четыре источника в одном месте						96,184	25,658	1,528

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, например, [2, 13].

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

Материалы, используемые для защиты от электромагнитного поля, должны соответствовать следующим требованиям:

- высокий коэффициент экранирования (SE);
- устойчивость к механическим воздействиям и простота в обращении (жесткость, гибкость, сила тяжести и т. д.), в том числе при установке и герметизации;
- устойчивость к вредным воздействиям окружающей среды (коррозии и окислению);
- прочность;
- однородность;
- простота формирования экрана;
- низкая стоимость производства.

Целью данной главы является изучение свойств фильтров, защищающих от электромагнитного (ЭМ) излучения современных электронных устройств личного пользования – ноутбуков или лэптопов, мобильных телефонов, устройств Wi-Fi, микроволновых печей и т.д. Экранирующие фильтры могут быть изготовлены с использованием различных технологий как с точки зрения радиопоглощающего слоя, так и с точки зрения подложки.

Впервые проведено всестороннее исследование свойств различных типов фильтров, защищающих от электромагнитного (ЭМ) излучения современных электронных устройств для личного пользования. Анализ проводился для всех компонентов электромагнитного загрязнения, включая напряженность электрического и магнитного полей и мощность излучения. Защитные фильтры

были изготовлены с использованием различных технологий, включая наночастицы переходных металлов, имплантированные в стекло, металлопластиковую фольгу, стекла с различными видами покрытий из оксидов металлов на основе ИТО и ZnO. Получены значения коэффициентов снижения электромагнитного загрязнения для различных типов защитных фильтров, позволяющие дать рекомендации по их практическому применению.

4.1. Технологии получения материалов с наночастицами переходных материалов, имплантированных в стекло, и фольгированных материалов

Были выполнены исследования нескольких групп защитных материалов. В первую группу входили образцы, изготовленные в российских организациях, производящих коммерческие стекла и фольги (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Образцы 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. Образец SSiSR PS4 (Silver) выглядит как фольга. Защита от ЭМИ обеспечивается металлическим слоем, нанесенным на тонкую полимерную пленку. Еще один образец – это пленка LLumar.

Схематическая структура различных образцов проиллюстрирована на Рисунке 4.1.

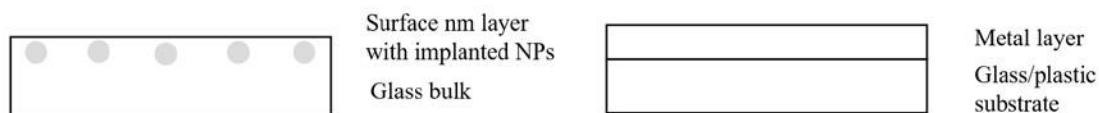


Рисунок 4.1 – Схематическая структура различных образцов.

Примечание – Слева – образцы Института стекла (надписи: Объем стекла; Поверхностный нанослой с имплантированными наночастицами); справа – другие образцы (надписи: Стеклянная или пластиковая подложка; Металлический слой)

Многие компании работают с металлизированными пластиковыми или фольгированными радиочастотными экранирующими фильтрами из-за их гибкости, малого веса и простоты обработки (их можно разрезать). Наиболее известными являются пленки Silver и LLumar.

Серебристая пленка Silver выглядит как непрозрачное зеркало. Она пропускает свет только в одном направлении. Пленки изготавливаются путем нанесения металлизированного слоя на прозрачный полиэфир. Полиэфирный рулон наматывается на охлаждаемый водой ролик в большой вакуумной камере. Металл (обычно Al) испаряется на холодную поверхность пленки. Такая металлизированная пленка снижает ЭМИ на 18–22 дБ на частоте 300 МГц и на 35–38 дБ на частоте 2000 МГц. Серебряные пленки толщиной 37,5 мкм и прозрачностью 62% используются в архитектуре как для защиты от ЭМИ, так и для создания комфортной световой среды. Аналоги серебряной пленки со спеченными серебряными нанопроволок описаны в [63, 64].

Пленка LLumar изготовлена из гибких радиопоглощающих материалов EXSOB и FAM [65]. Состав не раскрывается в публикациях. В соответствии с техническими характеристиками пленка FA M3 – пленка толщиной 0,75 мм, предназначенная для защиты ноутбуков и мобильных телефонов, обеспечивает

радиопоглощение 0,90 дБ (18,72%) на частоте 0,9 ГГц, –1,42 дБ (27,91%) на частоте 1,8 ГГц, –1,87 дБ (35,03%) на частоте 2,4 ГГц. Пленки FAM обладают следующими преимуществами: они обеспечивают высокоэффективное подавление шума в диапазоне частот от 10 МГц до 60 ГГц; они подавляют резонансные частоты и повторные отражения сигналов от экранов; высокое поверхностное сопротивление (10^6 – 10^8 Ом); их легко вырезать из листов большого размера (400*400 мм). и легко монтируется.

4.2. Технология нанесения защитных пленок на основе стекла, покрытого пленками окиси индия и олова ITO (In_2O_3)

Мы также исследовали уменьшение ЭМИ несколькими образцами стекла, покрытого пленками окиси индия и олова ITO (In_2O_3), выполненными в нескольких вариантах (на приведенных ниже рисунках материалы 3,4,5). Этот материал 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.

Таблица 4.2 – Обозначения образцов с ITO покрытиями

3203.20	Type A
9-12-20	Type B
MS-3-09	Type C
N320320	Type D

Образцы ITO покрытий (C (материал 2 в приводимых ниже таблицах и рисунках), D (материал 3) и B (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 C, D из мишени производства Girmet

LLC, Russia; образец В – Kurt J. Lesker Company Ltd, USA) на установках, соответственно ВУП-11М (Рисунок 4.2b), МИР-2 (Рисунок 4.2a) и Kurt J Lesker PVD 75 (Рисунок 4.2d). Образцы В, С были нанесены на стеклянные подложки с добавлением кислорода с целью улучшения оптических характеристик прозрачного проводящего слоя (3% O_2 для образца С и давления O_2 $4,8 \times 10^{-4}$ Торр при общем давлении в камере 3×10^{-3} Торр для образца В).

Если покрытия ИТО С и В наносилась на стеклянную подложку, то слой ИТО D был нанесен на подложку из полиэтилентерефталата (ПЭТ или PET, Polyethylene terephthalate), для чего после предварительной очистки подложек путем промывки в ваннах с изопропиловым спиртом и деионизованной водой производилась активация полимерных пленок проводится на лабораторной установке плазменной активации УПМ-500 в плазме Ag при давлении 1,1 Торр, напряжении и мощности разряда соответственно 350 В и 150 Вт.

Также был синтезирован образец ИТО покрытия А (материал 5), нанесенный методом реактивного магнетронного распыления из двух мишеней In и Sn в среде кислорода на установке УНИП-900П (Рисунок 4.2c) [71], оснащенной источником ионов холловского типа для предварительной очистки и активации поверхности подложек.

Толщина и удельное поверхностное сопротивление полученных образцов приведены в Таблице 4.3.



a)



b)



c)



d)

Рисунок 4.2 – Технологическое оборудование для нанесения различных видов пленок ИТО. См. текст.

Таблица 4.3 – Параметры нанесенных ИТО слоев

№ образца		Толщина покрытия, нм	Удельное поверхностное сопротивление, Ом/кв
MS-3-09	материал 2	150	102
N320320	материал 3	98	190
9-12-20	материал 4	100	150
3203.20	материал 5	83	201

Для образцов этой группы помимо параметров защиты от ЭМИ было измерено оптическое пропускание. Коэффициент пропускания ИТО образцов определялся с использованием спектрофотометра Shimadzu UV-3600i Plus в диапазоне от 380 до 780 нм с разрешением 1 нм при нормальном падении света на образец.

Спектр оптического пропускания тестируемых образцов в видимом диапазоне представлен на Рисунке 4.3.

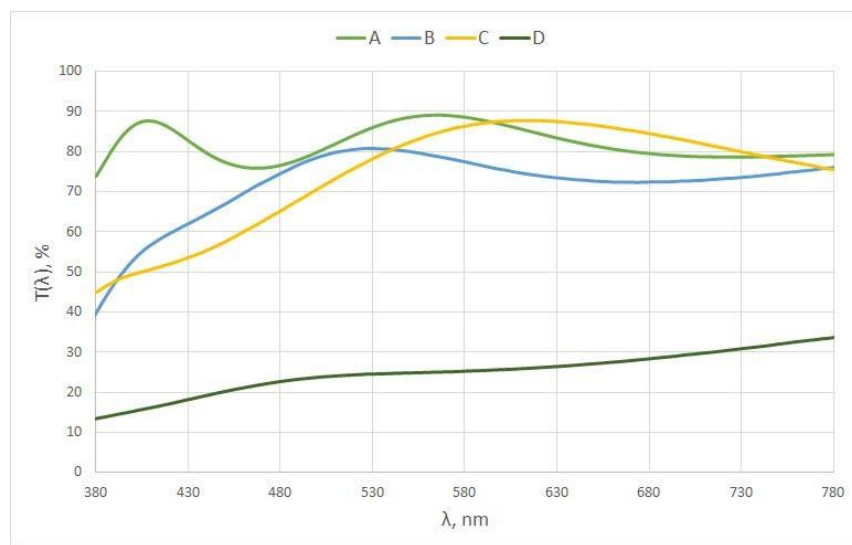


Рисунок 4.3. Спектр пропускания образцов с ИТО покрытиями (Табл.4.2)

4.3. Технология синтеза структуры на основе оксида цинка с периодической пространственной локализацией донорной примеси для уменьшения уровня электромагнитного излучения

В этом разделе изучены процессы синтеза многослойных периодических структур (сверхрешеток) с высокой структурной разупорядоченностью на основе повторяющихся систем ZnO/ZnO:Al, а также их структура и физические свойства. Представленные технологии и результаты опубликованы в [88, 91].

Выполнены исследования холловских параметров, оптического пропускания, структуры нелегированных слоев ZnO, слоев ZnO:Al (AZO) и

многослойных систем с числом повторяющихся пар $\text{ZnO}/\text{ZnO:Al}$ до $n = 50$ при температурах синтеза до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также выполнена оценка уменьшения уровня электромагнитного излучения, проходящего через пленки с такими структурами.

Установлены механизмы трансформации структур сверхрешеток $\text{ZnO}/\text{ZnO:Al}$ с изменением толщины элементарных слоев и температур синтеза. Показана возможность многофункционального использования таких покрытий в качестве прозрачных электродов дисплеев и уменьшения уровня электромагнитного излучения в 3–5 раз.

Изучены процессы формирования, структуры, электропроводности и оптического пропускания в многослойных периодических структурах с высокой структурной разупорядоченностью на основе систем $\text{ZnO}/\text{ZnO:Al}$ (AZO/ZnO), синтезированных методом магнетронного распыления керамических мишеней.

4.3.1. Эксперимент

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 (Рисунок 4.4.).



Рисунок 4.4 – Схема взаимного расположения магнетронов и подложек в рабочей камере

Для осаждения слоев использовались керамические мишени ZnO, AZO (3 at % Al) и AZO (3 at % Al) диаметром 51 мм и толщиной 4 мм, полученные путем искрового плазменного спекания (SPS) субмикронных порошковых смесей оксида цинка и оксида алюминия.

Перед началом распыления рабочая камера откачивалась до остаточного давления 2×10^{-4} Па. Распыление проводилось в атмосфере аргона (5N) при давлении в камере 0,3 Па на постоянном токе в режиме стабилизации тока ($I = 120$ мА). Расход газа в процессе распыления был стабилизирован на уровне 30 ст. см³/мин. В качестве подложек на каждый держатель были установлены по одной пластине размерами 25×26×1,1 мм из боросиликатного стекла и по одной термически окисленной с поверхности кремниевой пластине размерами 25×10×0,5 мм, для SEM измерений толщин.

Перед началом осаждения проводилось предварительное распыление каждой мишени на заслонку в течение 5 минут. Осаждение слоев проводилось в едином цикле на подложки с разной температурой: 50, 100, 200 и 300 °С. Минимальное расстояние от мишени до подложки составляло 100 мм, а длительность процесса осаждения – 200 минут. Скорость вращения барабана при осаждении одиночных слоев составляла 10 об/мин, а при осаждении многослойных структур устанавливалась из расчета обеспечения формирования заданной архитектуры].

Рентгеноструктурные исследования проводились с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000 с источником CuK α (Япония). Данные по оптическому пропусканию слоев были получены на спектрофотометре UV3600 (Shimadzu, Япония). Морфология поверхности и сколов слоев исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO 1450 (Carl Zeiss, Германия).

4.3.2. Результаты и обсуждение

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 ZnO;
- 2) ZnO:Al (AZO, 3 at.%);
- 3) 2 пары слоев «ZnO/AZO»;
- 4) 10 пар слоев «ZnO/AZO»;
- 5) 50 пар слоев «ZnO/AZO».

Архитектура многослойных структур показана на Рисунке 4.5.

Все слои синтезированы при температурах подложек 50, 100, 200 и 300°C в среде Ar.

Многослойные структуры на основе пар слоев AZO/ZnO с неизменной общей толщиной были сформированы следующим образом:

- две пары слоев – чередующиеся слои AZO и ZnO с толщинами 75 нм;
- 10 пар слоев – чередующиеся слои с толщинами 15 нм;
- 50 пар слоев – чередующиеся слои с толщинами 3 нм.

Архитектура многослойных структур показана на Рисунке 4.5.

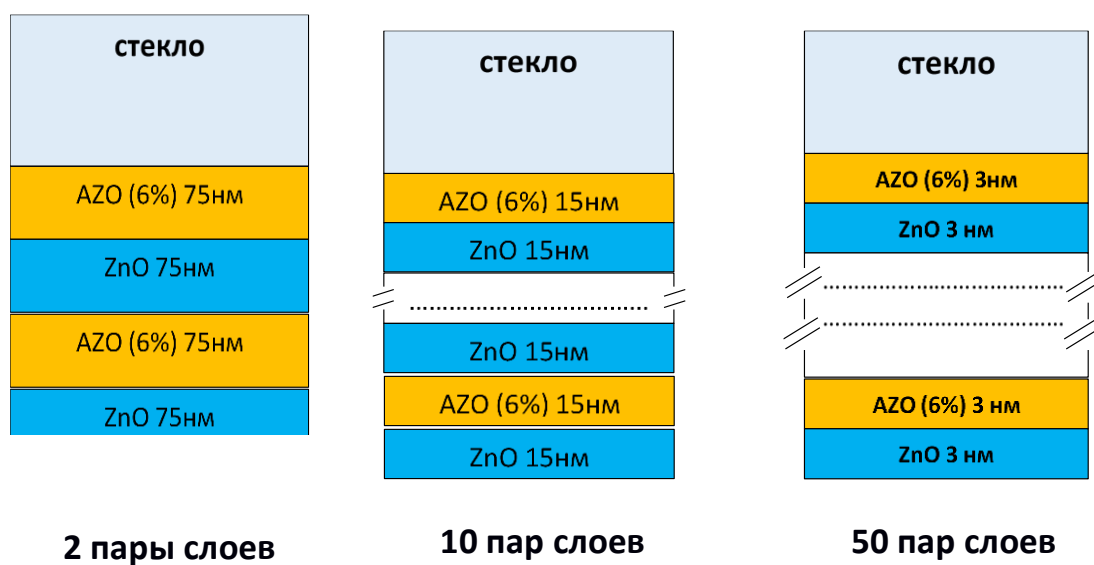


Рисунок 4.5 – Архитектура исследованных структур ZnO/AZO/ZnO

В Таблице 4.4 приведены поверхностные сопротивления, толщины, холловские параметры слоев, синтезированных при температурах 200 и 300 °С.

Таблица 4.4 – Холловские параметры синтезированных слоев и многослойных структур

Наименование мишени и слоев	R_{sq} , Ом/кв	d, нм	$\square$, 10^{-4} Ом*см	μ , см ² /В с	n, 10^{20} см ⁻³
ZnO (200 °C)	89300	256	22860	0.85	0.032
ZnO (300 °C)	24400	240	5856	2.93	0.036
AZO 3% (200 °C)	21	440	9,2	16,01	4,23
AZO 3% (300 °C)	8,6	420	3,6	22,41	7,75
2 пары слоев (200 °C)	410	420	172,2	3,95	0,98
2 пары слоев (300 °C)	33	400	13,2	16,34	2,90
10 пар слоев (200 °C)	374	277	103,6	5,13	1,22
10 пар слоев (300 °C)	230	270	62,2	5,96	1,69
50 пар слоев (200 °C)	242	300	72,6	5,45	1,58
50 пар слоев (300 °C)	196	290	56,8	5,77	1,91

Нелегированные слои обнаруживают высокие удельные сопротивления и низкие подвижности заряда. Легирование алюминием приводит к существенному росту электропроводности и подвижности.

Структуры, составленные из двух пар слоев (ZnO/AZO), сохраняют электрические характеристики слоев AZO. Увеличение числа пар в синтезированных многослойных структурах приводит к некоторому снижению электропроводности и подвижности.

На Рисунке 4.6 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 ZnO, синтезированных методом магнетронного распыления. Слои имеют столбчатую структуру и выраженный рельеф поверхности.

Спектры оптического пропускания слоев и многослойных структур, синтезированных в диапазоне (300–1300) нм, приведены на Рисунке 4.7.

Анализ спектров пропускания (Т) показывает следующее:

1. Спектры нелегированных слоев ZnO, синтезированных при различных температурах, не обнаруживают сколь-нибудь значимых различий в положении края поглощения и изменений величин пропускания в ИК области. Как показывают холловские параметры слоев (см. Таблицу 4.4), это обусловлено высокими сопротивлениями нелегированных слоев.

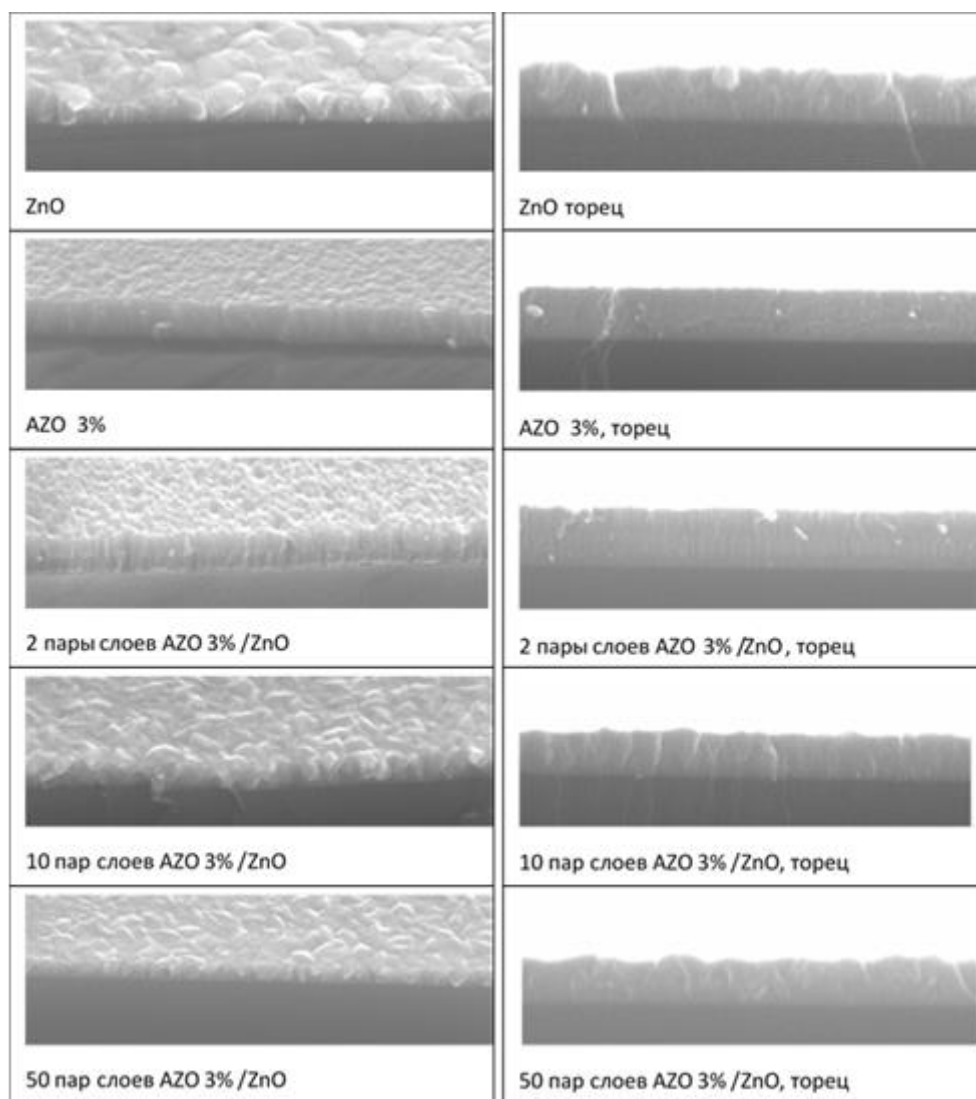
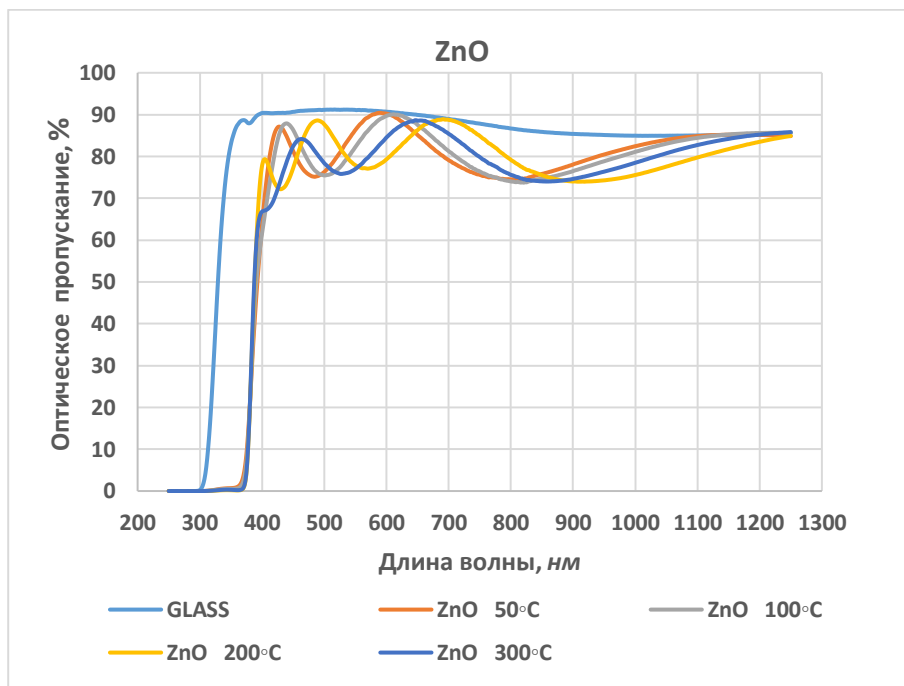
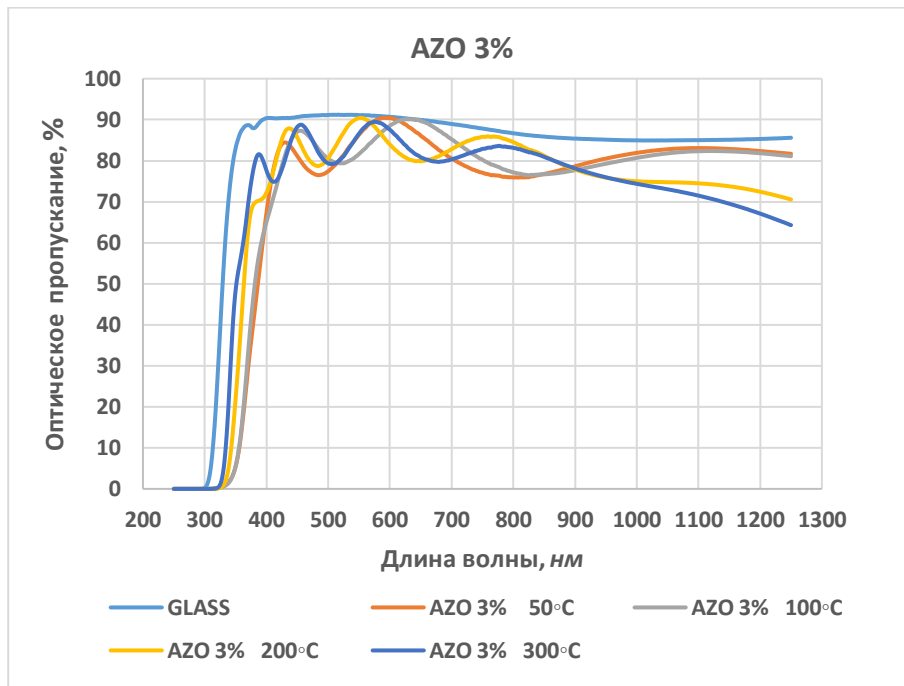


Рисунок 4.6 – СЭМ микрофотографии слоёв ZnO (а), AZO (б) и многослойных структур $2 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$ (в), $10 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$ (г) и $50 \times (\text{AZO}/\text{ZnO})$ (д), синтезированных при 300°C. Масштаб .

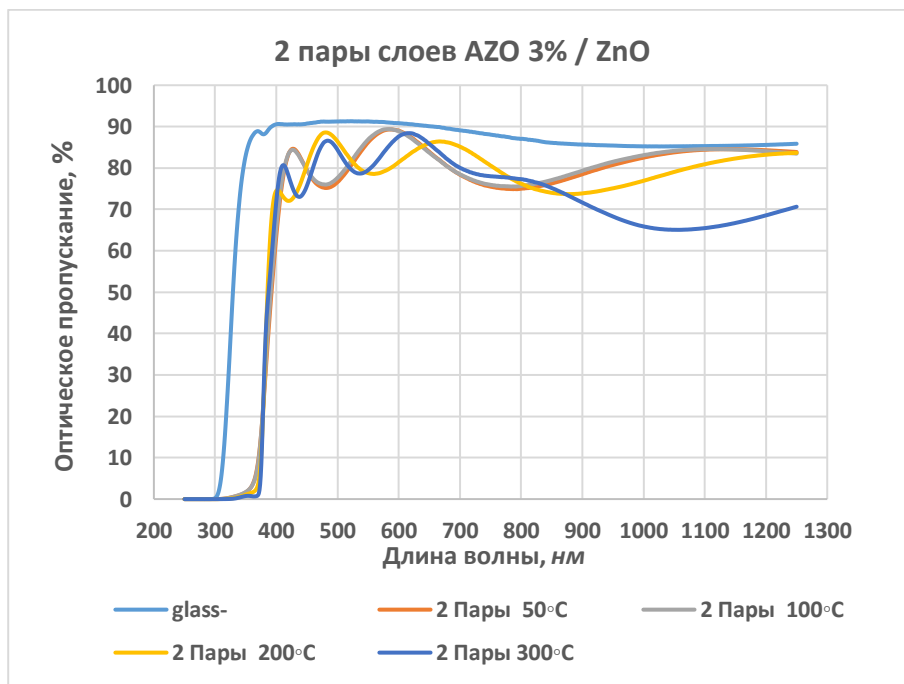
2. В слоях ZnO:Al с ростом температуры синтеза возрастает концентрация свободных носителей в связи с температурным ростом десорбции кислорода с поверхности и с совершенствованием структуры. При этом наблюдается коротковолновое смещение края собственного поглощения Бурштейна – Мосса и снижение оптического пропускания в ИК области вследствие отражения электромагнитного излучения на свободных электронах.



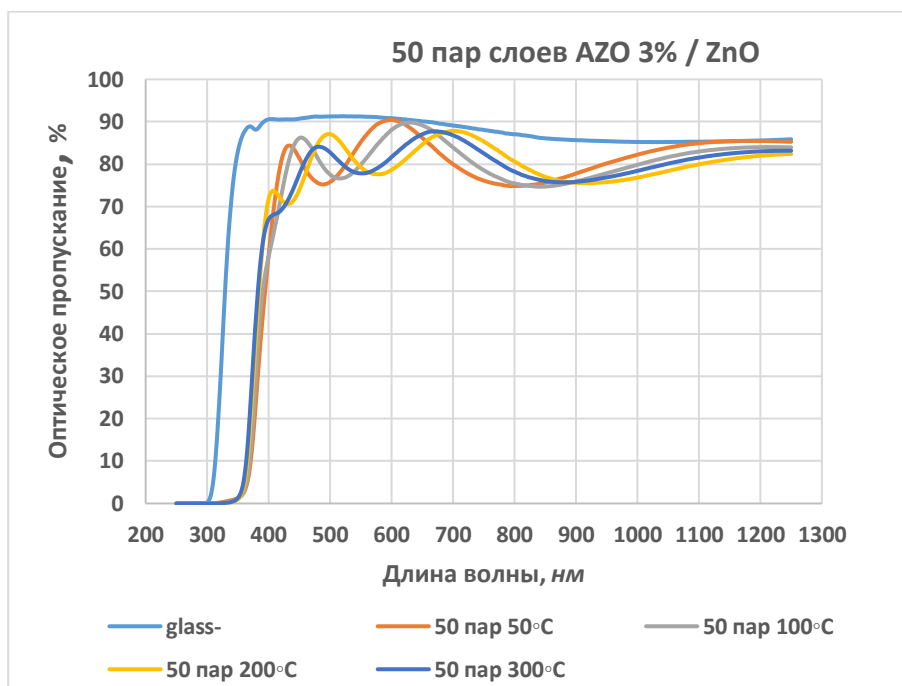
а



б



в



Г

Рисунок 4.7 – Спектры оптического пропускания слоев и структур, синтезированных при температурах от 50 до 300 °С

3. В периодических структурах на основе слоев из двух пар «ZnO/AZO» с увеличением температуры синтеза выявлено разнонаправленное поведение кривых оптического пропускания. При низких температурах синтеза наблюдается некоторое относительное коротковолновое смещение края поглощения Бурштейна – Мосса, а при температуре синтеза 300 °С край поглощения смещается вправо, в то время как ИК отражение на свободных электронах снижается. Видимо, это связано с тем, что в процессе роста при температуре 300 °С синтеза в среде аргона происходит миграция атомов цинка к поверхности роста и образование в приповерхностном слое области с высокой концентрацией электронов.

Средние величины оптического пропускания в спектральном диапазоне $\lambda = (300\text{--}1300)$ нм приведены в Таблице 4.5. Все синтезированные слои имеют близкие величины в окрестностях (82–83) %.

Таблица 4.5 – Данные обработки спектров оптического пропускания.

Исследуемые слои	Среднее оптическое пропускание в видимой области (400–700 нм), %			
	T = 50 °C	T = 100 °C	T = 200 °C	T = 300 °C
ZnO нелегированный	83,11	82,98	81,92	81,16
AZO 3%	83,46	84,12	83,30	83,09
2 пары слоев	82,26	82,58	82,06	82,31
10 пар слоев	81,27	83,17	81,75	83,47
50 пар слоев	82,57	82,44	80,70	80,73

На Рисунке 4.8 показаны результаты обработки рентгеноструктурных исследований. «Сравниваемые слои синтезированы при температуре 200 °C. Слой нелегированного ZnO имеет типичную базовую ориентацию (002)ZnO. Легирование алюминием (см. кривую AZO3%) приводит к существенному росту рефлекса (002)ZnO» [89].

Анализ динамики трансформации дифрактограмм многослойных структур с различным числом пар AZO/ZnO показывает, что увеличение числа пар (т.е., ступенчатое уменьшение толщин элементарных слоев AZO и ZnO) приводит к плавной аморфизации структур. Это может быть обусловлено, в частности, кратковременными прерываниями процесса роста при вращении барабана и последующим формированием нового слоя с иным составом и, соответственно, с трансформированными параметрами решетки. Однако при достижении определенного числа пар в структуре наблюдается восстановление кристалличности слоев (см. кривую для 50 пар). Это обусловлено наличием рельефа поверхности слоев и размытием металлургических границ слоев.

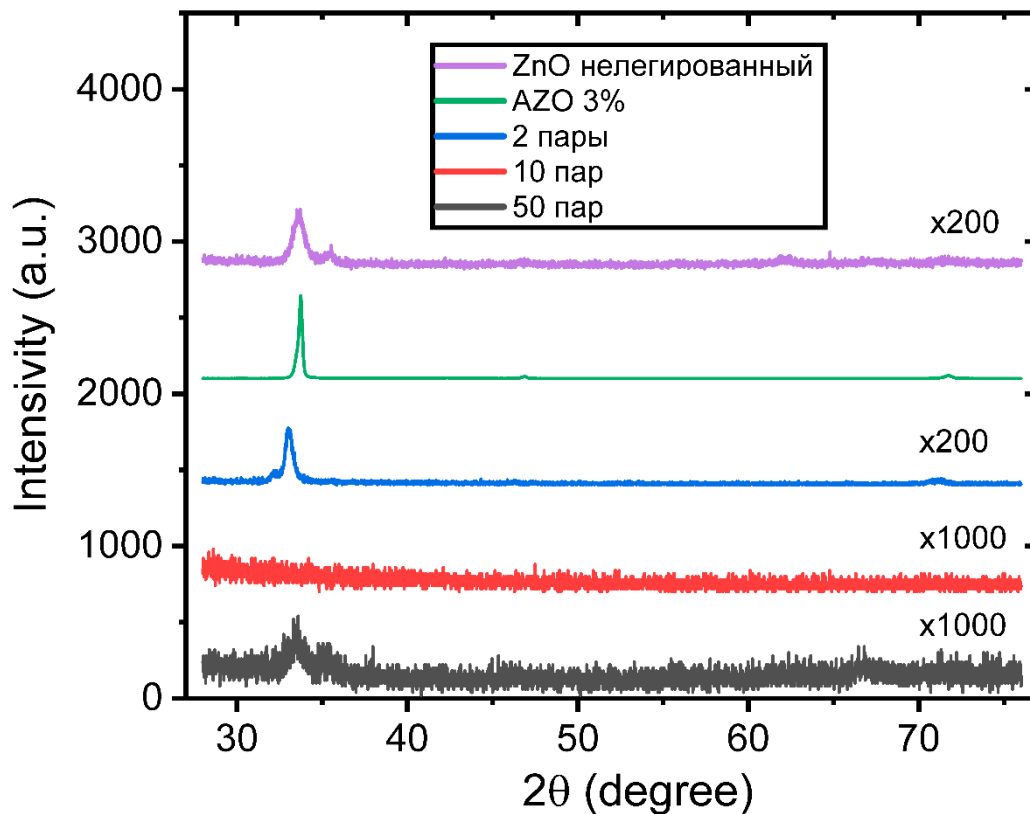


Рисунок 4.8 – Дифрактограммы слоев ZnO, AZO и многослойных структур на основе «ZnO/AZO», синтезированных при 200°C. Использовался метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, дифрактометр Shimadzu XRD-7000 с источником CuK α (Япония). По осям: горизонтальная – угол дифракции в градусах, интенсивность дифракции в относительных единицах

В результате по этой технологии можно сделать следующие промежуточные выводы. Изучение процессов магнетронного синтеза многослойных периодических структур (сверхрешеток) на основе чередующихся слоев нелегированного и легированного оксида цинка, а также структуры и свойств полученных пленок показало следующее:

1. При фиксированных объеме материала и количестве легирующей примеси увеличение числа пар слоев «диэлектрик/полупроводник» приводит к ступенчатой аморфизации слоев. Порог аморфизации лежит в области толщин диэлектрика и полупроводника около (10–15) нм.

3. Дальнейшее уменьшение толщин слоев приводит к разрушению металлургических границ слоев и к постепенной кристаллизации. Сверхрешетки на основе 2 пар слоев «ZnO/AZO» сохраняют близкие к слоям AZO электрические характеристики.

4. Увеличение числа пар слоев в сверхрешетках до 10 приводит аморфизации слоев, к снижению электропроводности и подвижности носителей. Это обусловлено формированием на границах слоев буферных слоев с высокой дефектностью. Дальнейшее увеличение числа пар слоев «ZnO/AZO» до 50 приводит к росту кристалличности слоев, что обусловлено уменьшением толщин элементарных слоев до 3 нм и устранением металлургических границ между слоями.

Такая структура способствует повышению поглощения в мегагерцовом диапазоне. Оценка уменьшения пропускания электромагнитного излучения дает величину 3–5 раз.

4.4. Особенности метода измерения параметров электромагнитного излучения для разных материалов

Как и в главе 3, в этой главе исследован эффект снижения индекса воздействия электромагнитного загрязнения (ЕМПИ), который был вызван четырьмя радиочастотными источниками с несколькими экранирующими материалами, и сравнили эти значения со значениями, полученными без использования экранирующего материала. Поэтому проведены измерения, отслеживая все значения, которые включают четыре источника с экранирующими корпусами, представленные в Таблице 1 для компонентов ЕМПИ (ЭМЗ): напряженность магнитного поля (мА/м), напряженность электрического поля (В/м) и плотность мощности излучения (Вт/м²).

В этом разделе выполнена оценка уровня снижения электромагнитного излучения, генерируемого следующими устройствами, излучающими в диапазоне МГц и ГГц:

- портативный компьютер (ЖК) Lenovo ideapad 100–15IBD с процессором Intel ® core (TM) i3-5005u CPU@2.00GHz;
- Wi-Fi 2300 MHz;
- мобильный телефон Huawei Y7 Prime 2018 с частотой 1,4 ГГц + 1,1 ГГц и 1800 МГц;
- микроволновая печь с частотой 2450 МГц.

В ходе эксперимента все устройства были протестированы в их обычном рабочем состоянии. Электромагнитный экранирующий фильтр был установлен между устройством и портативным трехкоординатным измерителем напряженности радиочастотного поля TM–195 TENMARS TEST & MEASUREMENT INSTRUMENTS.

На Рисунке 4.9 показана схема экспериментального метода. Расстояние между экранами и измерительным устройством составляет 5 см.

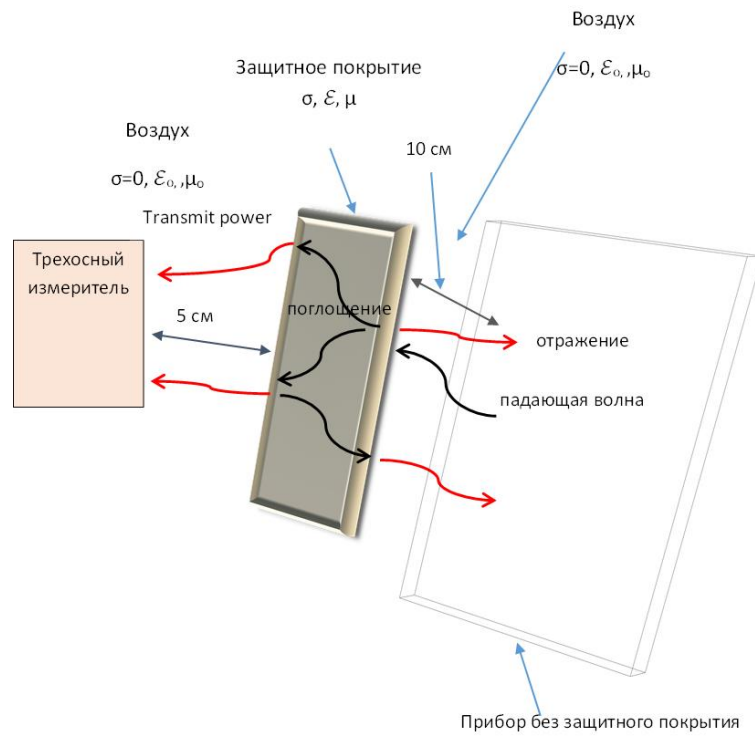


Рисунок 4.9. Схема эксперимента

Было исследовано две группы экранирующих материалов. В первую группу входят образцы российских учреждений, выпускающих коммерческие стекла или фольгу. Они представлены в Таблице 4.1.

4.5. Результаты измерений

На Рисунке 4.10 представлены фотографии исследованных образцов, созданных по разным технологиям.

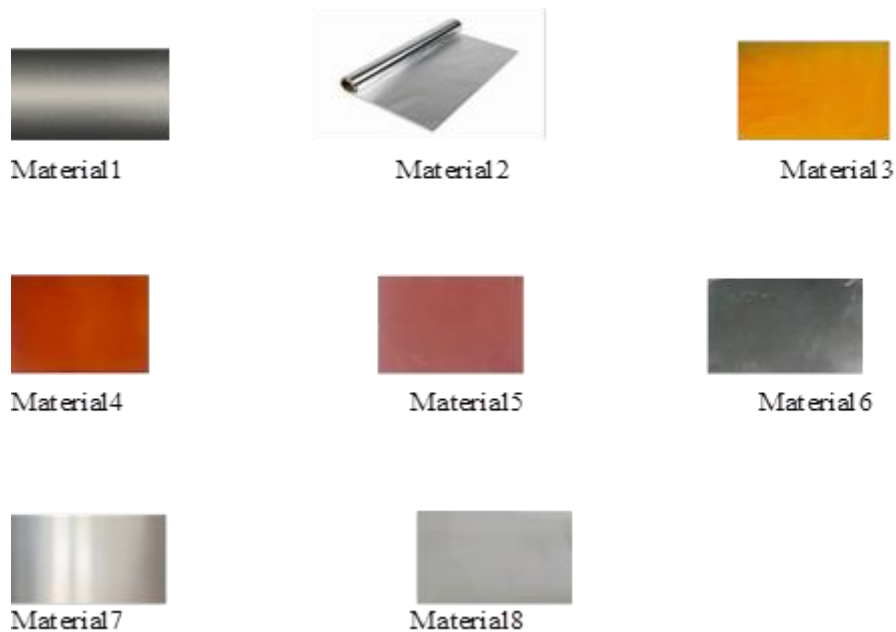


Рисунок 4.10 – Образцы материалов по разным технологиям

Результаты по электромагнитно-экранирующим свойствам стекол и фольги, выпускаемых промышленностью, представлены на Рисунках 4.11–4.14 и в Таблицах 4.6–4.11. Результаты опубликованы в [85].

В Таблице 4.6 приведен коэффициент уменьшения ЭМИ, сгенерированного мобильным телефоном, для трех компонентов ЭМИ. Его можно определить следующим образом:

$$\text{Коэффициент уменьшения} = (V_{sh} / V_{wsh}),$$

где V_{sh} – измеренное значение сигнала с экранированием;

V_{wsh} – без экранирования.

Из Рисунка 4.11 и Таблицы 4.6 видно, что образец с материалом 1 снизил напряженность электрического поля (E) и плотность мощности (P) до минимальных значений, но значение напряженности магнитного поля (H) остается близким к значению до экранирования. Но в случае экранирования материалом 5 мы получаем коэффициент малого значения для каждого из трех компонентов: коэффициент уменьшения равен 0,41 в случае E, он также снижает P до коэффициента 0,31. В то время, как в случае уменьшения H материал 5 также имеет небольшой коэффициент 0,54, когда мы сравнивали эти значения со значениями без защитного материала. Таким образом, мы можем рекомендовать материал 5 для защиты мобильных телефонов, он очень эффективен для снижения воздействия окружающей среды.

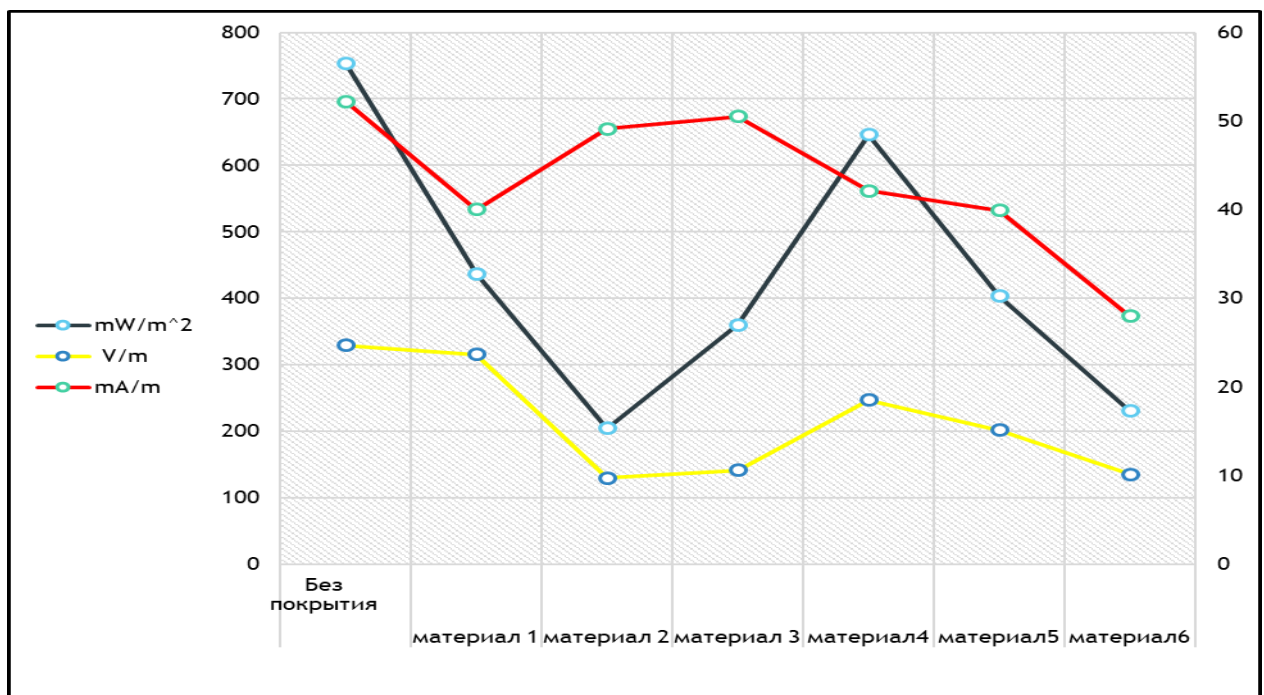


Рисунок 4.11 – Три компоненты ЕМРІ (ЭМИ), генерированные при работе мобильного телефона (мобильный Huawei Y7 Prime 2018 с частотой 1,4 ГГц + 1,1 ГГц, 1800 МГц) с электромагнитным экранированием и без него.

Таблица 4.6 – Коэффициент снижения риска, вызванного использованием мобильного телефона

Номер образца	Напряженность	Напряженность	Плотность
---------------	---------------	---------------	-----------

	магнитного поля	электрического поля	мощности
1	0,94	0,39	0,27
2	0,97	0,43	0,48
3	0,81	0,75	0,86
4	0,76	0,61	0,53
5	0,54	0,41	0,31
6	0,51	0,77	0,33

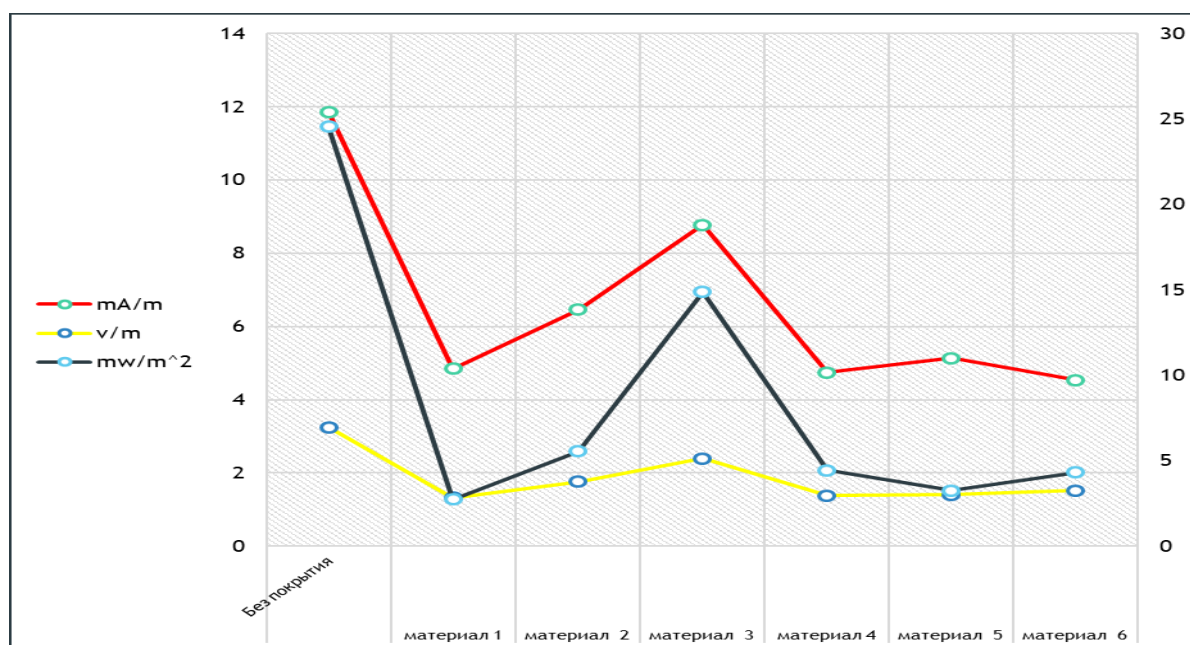


Рисунок 4.12 – Три компонента ЭМИ от ноутбука (Lenovo ideapad 100–15IBD с процессором Intel ® core (TM) i3-5005u CPU@2.00GHz) с электромагнитным экранированием и без него

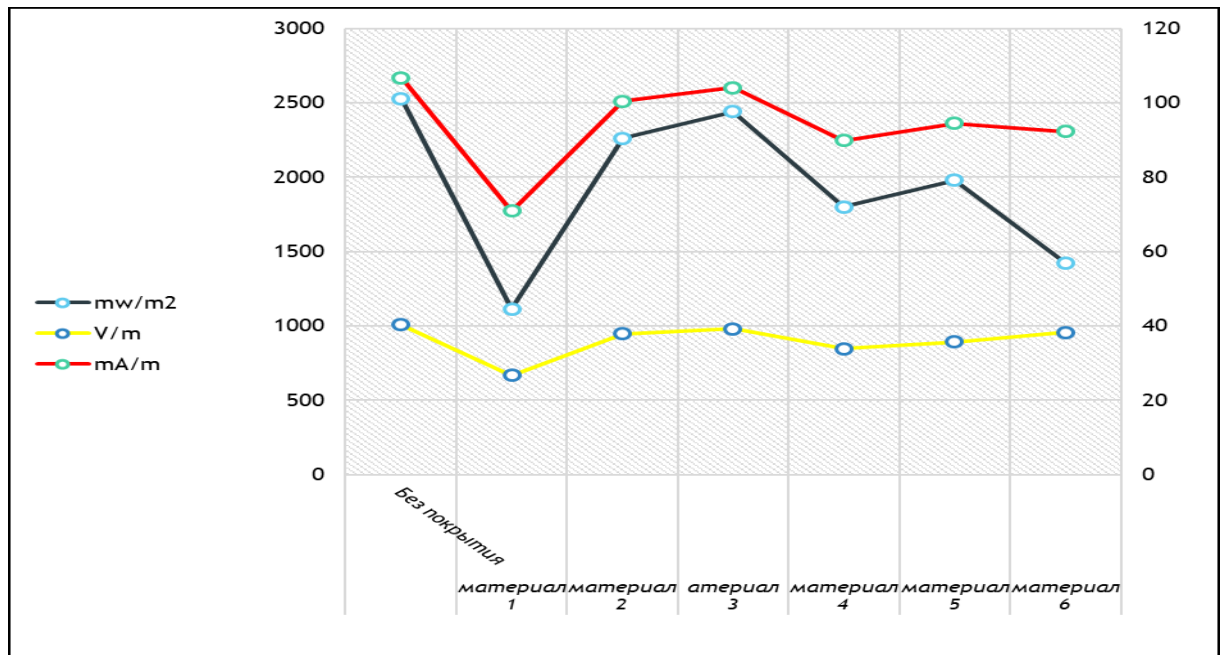


Рисунок 4.13 – ЭМИ (три компонента), сгенерированные работой микроволновой печи (2450 МГц) с экранированием и без него

В Таблице 4.7 показан коэффициент снижения ЭМИ, который был вызван использованием микроволновой печи для трех компонентов ЭМИ.

Из Рисунка 4.13 и Таблицы 4.7 видно, что материал 1 уменьшает уровень ЭМИ сравнительно со значением без экранирующего материала. При сравнении со значением без экранирования коэффициент E уменьшается до 0,66. Мы получаем минимальное значение уменьшенного значения P в случае материала 4. Но и материал 1 также имеет малое значение (коэффициент 0,44), когда мы сравниваем это значение со значением без защитного материала. По этой причине мы можем рекомендовать для защиты от СВЧ-излучения материал 1, который является очень эффективным с точки зрения уменьшения воздействия электромагнитных волн.

Таблица 4.7 – Коэффициент уменьшения ЭМИ, сгенерированного использованием микроволновой печи

Номер материала	Напряженность магнитного поля	Напряженность электрического поля	Плотность мощности
1	0,66	0,66	0,44
2	0,94	0,94	0,89
3	0,95	0,98	0,95
4	0,84	0,84	0,38
5	0,89	0,86	0,79
6	0,86	0,95	0,56

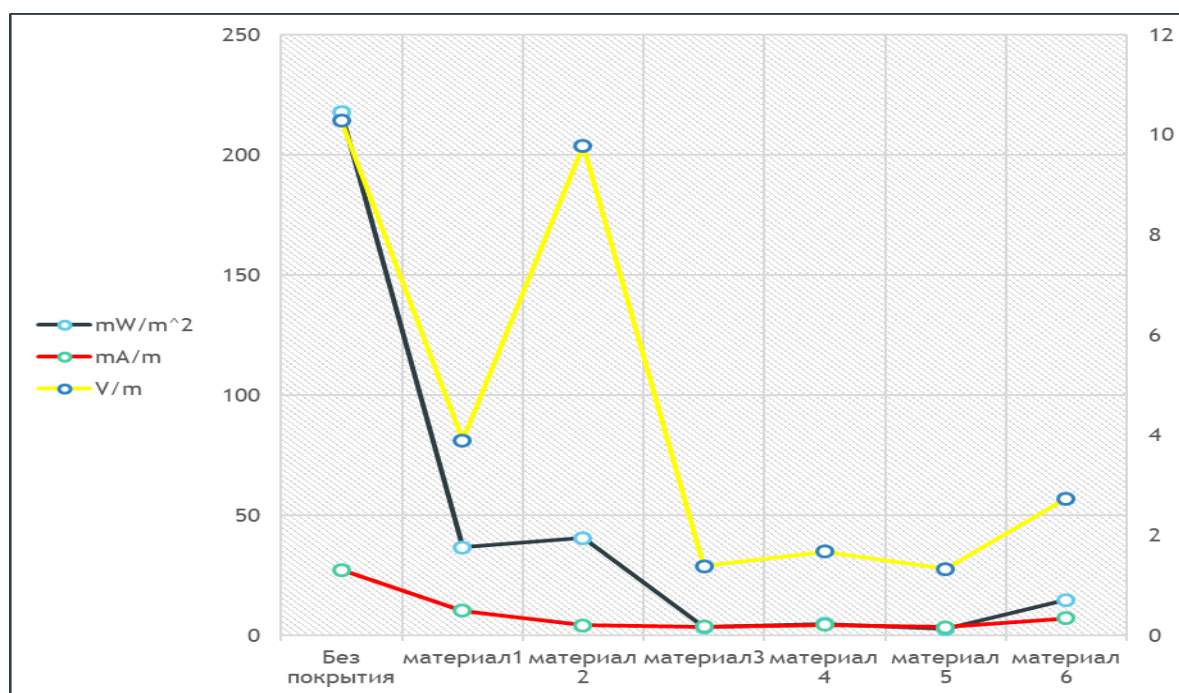


Рисунок 4.14 – ЭМИ (три компонента), сгенерированные Wi-Fi (2300) МГц с экранированием и без него

В Таблице 4.8 приведены данные по коэффициенту снижения ЕМРІ, которое было вызвано использованием Wi-Fi.

Таблица 4.8 – Коэффициент снижения ЕМРІ, которое было вызвано использованием Wi-Fi.

Номер материала	Напряженность магнитного поля	Напряженность электрического поля	Плотность мощности
1	0,38	0,38	0,17
2	0,15	0,95	0,19
3	0,14	0,14	0,016
4	0,16	0,16	0,022
5	0,13	0,13	0,013
6	0,27	0,27	0,068

Из Рисунка 4.17. и Таблицы 4.8 можно заметить, что материал 5 уменьшает значение ослабления уровня Н до коэффициента 0,13, когда мы сравниваем это значение со значением без экранирующего материала, и уменьшает значение Е до 0,13, когда мы сравниваем это значение со значением без экранирования. Это также снижает значение Р до коэффициента 0,013, когда мы сравниваем его со значением без защитного материала. В связи с этим мы рекомендуем использовать материал 5 для защиты Wi-Fi, который является очень эффективным для снижения воздействия ЕМРІ.

В Таблицах 4.9–4.12 и на Рисунках 4.15–4.18 представлены результаты по коэффициенту снижения ЭМИ, сгенерированного исследованными устройствами, для трех компонентов ЭМИ. Исследованы защитные покрытия на основе ИТО.

Таблица 4.9 – Коэффициент защиты от электромагнитного загрязнения мобильного телефона при использовании экранов с покрытием ИТО.

Образец №	Материалы для нанесения покрытий	Плотность мощности (Вт/м ²)	Напряженность электрического поля (В/м)	Напряженность магнитного поля (мА/м)
1	Без	1,00	1,00	1,00
2	Тип С	0,51	0,71	0,71
3	Тип D	0,58	0,78	0,78
4	Тип В	0,56	0,85	0,85
5	Тип А	0,52	0,82	0,82

Таблица 4.10 – Коэффициент снижения защиты от электромагнитного загрязнения портативного компьютера при использовании экранов с покрытием ИТО

Образец №	Плотность мощности	Напряженность электрического поля	Напряженность магнитного поля
1	1,00	1,00	1,00
2	0,87	0,93	0,93
3	0,92	0,96	0,96
4	0,93	0,96	0,96
5	0,90	0,95	0,95

Таблица 4.11 – Коэффициент снижения защиты от электромагнитного загрязнения WI-FI при использовании экранов с покрытием ИТО

Образец	Плотность мощности	Напряженность электрического поля	Напряженность магнитного поля
Без покрытия	1,00	1,00	1,00
A	0,39	0,65	0,66
B	0,90	0,91	0,92
C	0,40	0,60	0,61
D	0,40	0,61	0,62

Таблица 4.12 – Коэффициент защиты от электромагнитного загрязнения, создаваемого микроволновой печью, при использовании экранов с покрытием ИТО

Образец №	Плотность мощности	Напряженность электрического поля	Напряженность магнитного поля
1 (без покрытия)	1,00	1,00	1,00
2 (C)	0,34	0,69	0,69
3 (D)	0,37	0,77	0,71
4 (B)	0,32	0,65	0,65
5 (A)	0,37	0,69	0,69

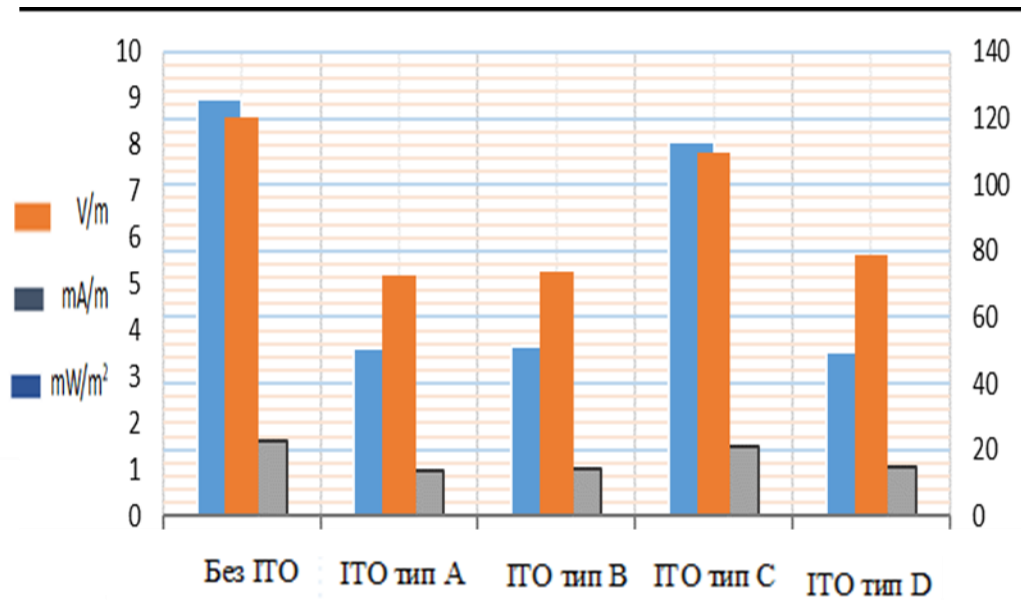


Рисунок 4.15 – Защита от электромагнитного загрязнения, создаваемого мобильным телефоном, с помощью пленок с покрытием ИТО

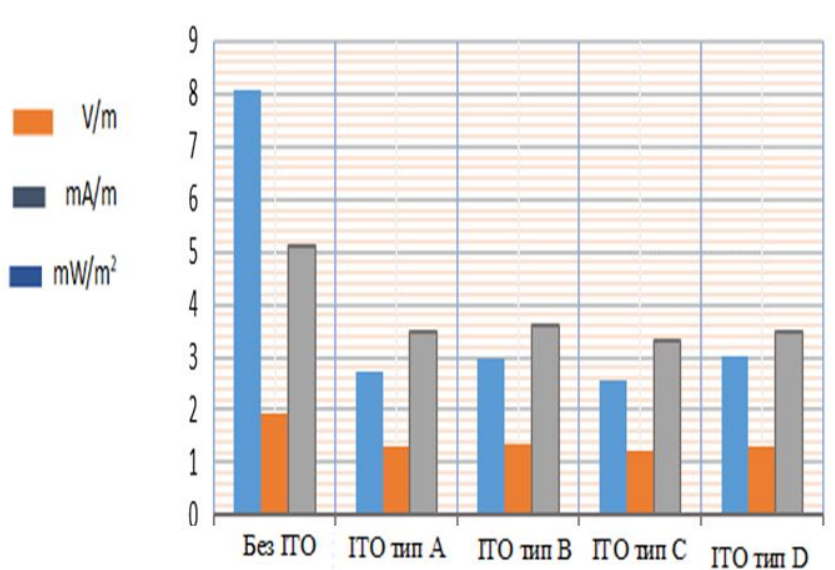


Рисунок 4.16 – Защита от электромагнитного загрязнения, создаваемого ноутбуком, с помощью металлических пленок с покрытием ИТО

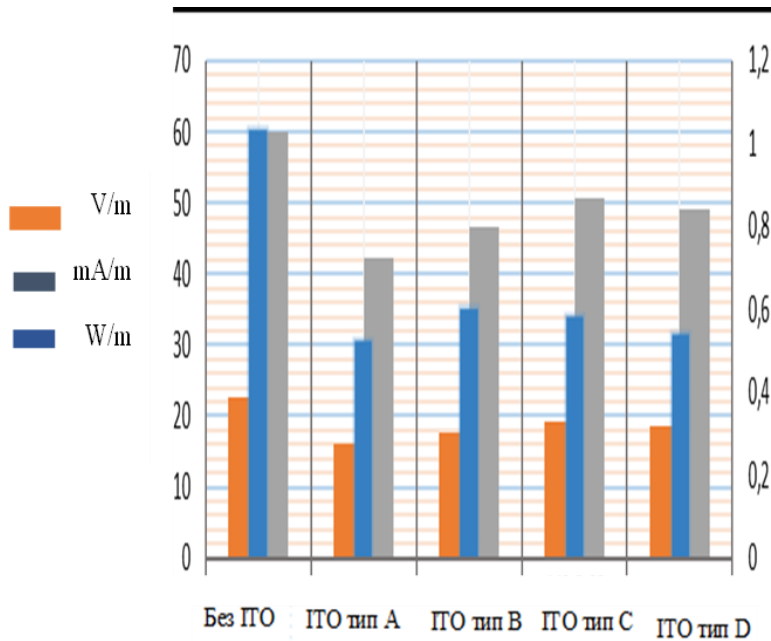


Рисунок 4.17 – Защита от электромагнитного загрязнения, создаваемого WI-FI, с помощью пленок с покрытием ИТО.

Из Рисунка 4.16 и Таблицы 4.9 видно, что случай 2 из Таблицы 4.9 (тип С) уменьшает значение ослабления уровня Н до коэффициента 0,61, когда мы сравниваем это значение со значением без металлических экранов с покрытием. Это уменьшает коэффициент для Е до 0,60, когда мы сравниваем это значение со значением без металлических экранов с покрытием. Это также уменьшает коэффициент Р до 0,40, когда мы сравниваем это значение со значением без металлических экранов с покрытием. В связи с этим мы рекомендуем в случае с мобильным телефоном лучше покрыть защитным фильтром металлическими экранами ИТО (тип С), который очень эффективен для снижения ЭМИ воздействия.

Из Рисунка 4.18 и Таблицы 4.11 видно, что образец 4 из Таблицы 7 (тип С) уменьшает значение Н до коэффициента 0,65, когда мы сравниваем это значение со значением без экранов с покрытием. Это уменьшает значение Е в 0,65 раза, когда мы сравниваем это значение со значением без экранов с покрытием. Это также уменьшает значение Р в 0,32 раза, когда мы сравниваем это значение со значением без экранов с покрытием. В связи с этим мы рекомендуем в случае с

ноутбуком лучше покрыть экрана фильтром из металлического ИТО (тип С), который очень эффективен для уменьшения воздействия ЭМИ.

Из Рисунка 4.17 и Таблицы 4.10 можно заметить, что в случае 2 (тип С) коэффициент Н уменьшается до 0,71, если сравнить это значение со значением без металлических экранов с покрытием. Это уменьшает значение Е в 0,71 раза, когда мы сравниваем это значение со значением без металлических экранов с покрытием. Это также уменьшает значение Р в 0,51 раза, когда мы сравниваем это значение со значением без металлических экранов с покрытием. В связи с этим мы рекомендуем в случае подключения к сети Wi-Fi лучше покрыть экран фильтром из металлического ИТО (тип С), который очень эффективен для уменьшения воздействия ЭМИ.

Для последнего устройства (микроволновой печи) из данных на Рисунке 4.18 и в Таблице 4.11 видно, что в случае 2 из Таблицы 7 (тип С) коэффициент Н уменьшается до 0,93, если сравнить это значение со значением без металлических экранов с покрытием. Это уменьшает коэффициент Е до 0,93, когда мы сравниваем это значение со значением без металлических экранов с покрытием. Это также уменьшает коэффициент Р до 0,87, когда мы сравниваем это значение со значением без металлических экранов с покрытием. Это наименьшее значение в данной ситуации, но оно недостаточно эффективно, чтобы его можно было рекомендовать для электромагнитной защиты.

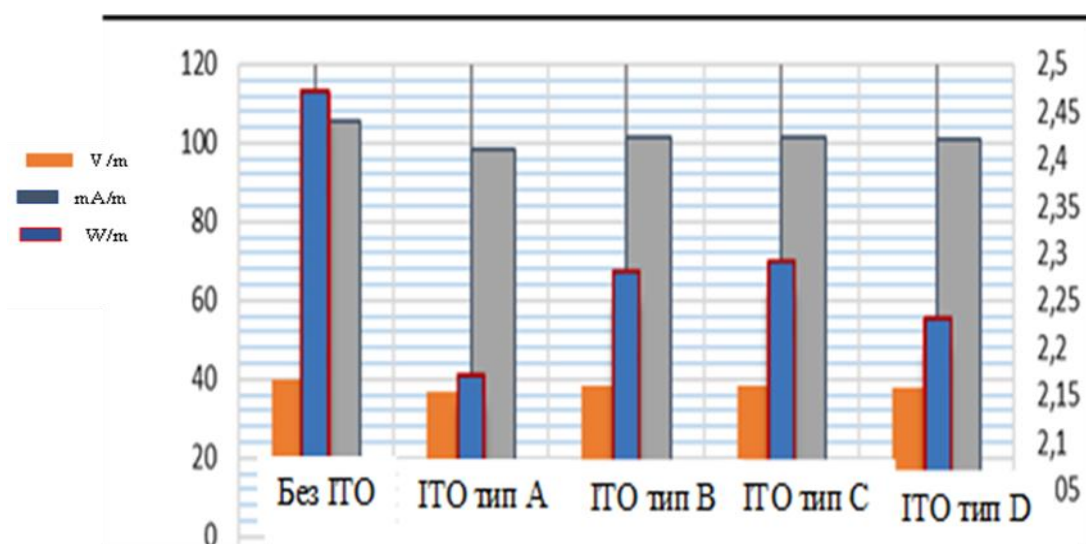


Рисунок 4.18 – Защита от электромагнитного загрязнения, создаваемого микроволновой печью, с помощью пленок с покрытием ИТО

Выполненный эксперимент направлен на защиту от электромагнитного загрязнения, которое было вызвано некоторыми источниками радиочастот, с помощью экранов с металлическим покрытием. Рассмотрим Рисунок 4.19. Он иллюстрирует сравнение трех составляющих ЭМИ свойств для двух групп фильтров, защищающих от электромагнитного загрязнения (ЭМЗ). Мы получили значения приведенных коэффициентов для ЭМИ (EMPI), используя две группы металлических экранов с покрытием. На Рисунке 4.18 можно заметить, что эти типы экранов с покрытием эффективны при работе с источниками загрязнения 1, 2 и затем 3. Но они не подходят для микроволновой печи. В последнем случае рекомендуется поискать другие материалы.

Исследование выявило случаи, когда уровень ЭМИ является значительным и необходима защита от этих устройств – источников ЭМИ. Следовательно, эта информация может быть использована для безопасного использования устройств. Кроме того, исследование включает в себя две группы защитных экранов с металлическим покрытием для устройств повседневной жизни, таких как мобильные телефоны, ноутбуки, Wi-Fi и микроволновые печи без риска.

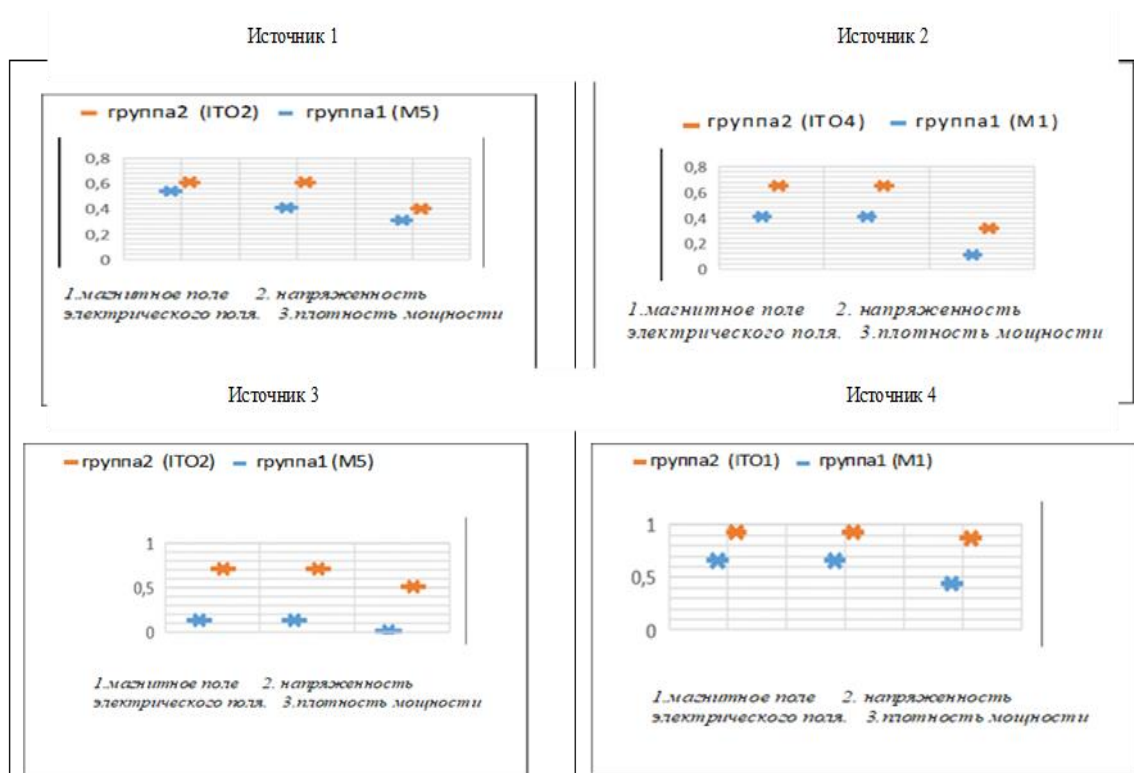


Рисунок 4.19 – Сравнение значений коэффициента уменьшения ЭМИ, вызванного четырьмя источниками (устройствами), для двух групп экранов (1 – стекла с НЧ и фольгированные материалы; 2 – покрытия на основе ITO)

Эти исследования стимулируют разработку физической модели прохождения электромагнитного излучения через тонкопленочные материалы сложного состава с элементами, имеющими различные электрофизические свойства в широком диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общие выводы

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 заметному 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 $\text{ZnO}/\text{ZnO:Al}$, а также их структура и физические свойства.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БЭК – безэховая камера

ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

ВЧ – высокочастотный

МКЗНИ – Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения

МПД – мощность поглощенной дозы

НЧ – наночастицы

ПДДА (PDDA) – поли(диаллилдиметиламмоний),

ПДМС (PDMS) – полидиметилсилоксан

ПЭВ – поглотители электромагнитных волн

ПЭТ – полиэтилентерефталат

РПМ – радиопоглощающие материалы

РЧ – радиочастотный

УНТ – углеродная нанотрубка

УПМ – удельная поглощенная мощность

ЭМБ – электромагнитная безопасность

ЭМЗ – электромагнитное загрязнение

ЭМИ – электромагнитное излучение

ЭМП – электромагнитное поле

ЭМС – электромагнитная среда

EME – electromagnetic environment

EMPI – electromagnetic pollution index (индекс электромагнитного загрязнения – ЭМЗ)

HMN Hollow Metal-Organic Framework /MXene/ Nanocellulose, композитная пленка – пустотелая органометаллическая сетчатая структура с MXene и наноцеллюлозой

ICNIRP – International Commission Non-Ionizing Radiation Protection

PET – Polyethylene terephthalate

SAR – Specific energy Absorption Rate

Список источников:

1. Махасин, Фра, Электромагнитное загрязнение от радиочастотных источников и их воздействие на человека / Махасин Фра, В. Беляев, И. Леонисова DOI: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.70.74 // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2020. – № 6. – С. 70-74.
2. Federal Communications Commission = Федеральная комиссия по связи // Scientific American. – August 2011. – P. 96.
3. Gurgan, D. Determination and analysis of electromagnetic pollution at two shopping malls in Konya at 100kHz-3GHz frequency / D. Gurgan, L. Seyfi // International Journal of Environment Science and Development (UESD). – 2018. Vol. 9, No 9. – P. 266-269.
4. Sarıkaya, N. M. Bir işyerinde elektromanyetik alan ölçümü yapılması ve sonuçlarının iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirilmesi : İş sağlığı ve güvenliği uzmanlık tezi (PhD Thesis) / Bir Nihan Merve Sarıkaya. – 2014.
5. Slottje, P. Exposure to electromagnetic fields (EMF) from mobile phone signals and effects on human brain activity and neurobehavioral performance / Pauline Slottje // Environmental Health, IRAS, Utrecht University, Division EEPI, IRAS, 2010. 0357308.
6. Петин, В. Г. Об одном российском термине (перевode SAR) в дозиметрии электромагнитного поля радиочастотного диапазона / В. Г. Петин, О. А. Григорьев, А. В. Меркулов, Ю. Г. Григорьев, К. А. Труханов // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2012. – Т. 52, № 5. – С. 542-545.
7. Guy, A. W. SAR and SAR Distributions in Man Exposed to 450-MHz Radiofrequency Radiation / Guy A. W.; Chung-Kwang Chou; B. Neuhaus. – DOI 10.1109/TMTT.1984.1132769 // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1984. – V. 32, No. 8. – P.752–763.

8. Fayed, I. Electromagnetic Radiation and its effects on human beings: Survey and Environmental Recommendations / Ibraheem Fayed. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/283510721>, May 2015.
9. URL: <https://www.fcc.gov/general/specific-absorption-rate-sar-cellular-telephones>
10. Anyaka, B. O. Electromagnetic Wave Effect on Human Health: Challenges for Developing Countries / Boniface O. Anyaka, Udochukwu B. Akuru, // International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discover, IEEE Computer Society, 2012.
11. Brodic. Measurement of the extremely low frequency magnetic field in the laptop neighborhood / Brodic. – DOI:10.17533/udea.redin.n76a05 // Rev.fac.ing.univ. Antioquia. – 2015. – No. 76.
12. Sven, K. Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Radiation from Wireless Devices in Home and Office Environments,” / Kühn Sven, Axel Kramer, Urs Lott, Niels Kuster // Proceedings International Workshop on Base Stations and Wireless Networks: Exposures and Health Consequences Switzerland, Geneva, June 15-16, 2005.
13. Public Safety Tech. Topic #17 FCC.gov. [Online]. URL: <http://www.fcc.gov/print/node/34806>.
14. Colin, R. Rapporteur’s Report / Roy Colin. // Proceedings International Workshop on Base Stations and Wireless Networks: Exposures and Health Consequences Switzerland, Geneva, June 15-16, 2005.
15. Atasoy, H. I. Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices / Atasoy Halil I. // Journal of Pediatric Urology. – 2013. – № 9. – P. 223e229.
16. Taher, M. Evaluation of the effect of radio frequency radiation emitted from wifi router and mobile phone simulator on the antibacterial susceptibility of pathogenic

- badena listeria monocytogenes and Escherichia coil / M. Taher, S. M. J. M. Moradi, S. Mansouri, G. R. Hatam, F. Nouri. – DOI 10.1177 // Journal.Sagepub.com/home/dos. – 2017. – P. 1-8.
17. Ariela, M. Use of laptop computers connected to internet through WiFi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation / Mata Ariela, Cesar A. Sanchrz Sarmiento // Fertility and Sterility. – 2012. – Vol. 2012. – P. 0015-0282.
 18. Величко, Д. Современные материалы для защиты от воздействия магнитных полей промышленной частоты / Д. Величко // Электроника: НТБ. – 2015. – № 9. – С. 132-136.
 19. Temaneh-Nyah, C. Characterization of Complex Electromagnetic Environment Created by Multiple Sources of Electromagnetic Radiation. World Academy of Science, Engineering and Technology / C. Temaneh-Nyah, J.Makche, J.Nujoma // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2014. – № 8 (11). – P. 1755-1759. – URL: scholar.waset.org/1999.5/9999774;
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:37581714>.
 20. ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) Guidelines for limiting exposure magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) // Health Physics. – 1998. – № 74 (4). – P. 494-522 (1998).
 21. Review of the scientific evidence on dosimetry, biological epidemiological observations, and health consequences exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz), ICNIRP 16/2009.
 22. Shabani, H. EM radiation from Wi-LAN base station and its' effects in human body / H. Shabani, M. R. Islam, A. H. M. Z. Alam, H. E. Abd El-Raouf. – DOI 10.1109/ICECE.2008.4769178// 2008 International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, Bangladesh, 2008. – P. 86-91.

23. Sevgi, L. Electromagnetic compatibility and electromagnetic pollution / L. Sevgi.
– TMMOB Electrical Engineering Society Istanbul Department Publishing
Series, 2000. – Vol. 320.
24. Vlach, P. F. The measured and predicted electromagnetic environment at urban
hospitals / Vlach P., Segal B., Pavlasek T. J. F. // Proceedings of International
Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1995. – P. 4-7. – URL:
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110723068>
25. Temaneh-Nyah, C. Comprehensive Characterization of Complex Electromagnetic
Environment / C. Temaneh-Nyah, J. Makiche, J. Nujoma. – DOI
02.IJNC.2015.1.12 // NNGT Int. J. on Networking and Computing. – 2015. –
Vol. 2. – P. 1-6.
26. Temaneh-Nyah, C. Developing a statistical model for electromagnetic enviroment
for mobile wireless networks / C. Temaneh-Nyah // World Academy of Science,
Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 61. – P. 744-747.
27. Temaneh-Nyah, C. Determination of a suitable Correction factor to a radio
propagation model for cellular wireless network analysis / C.Temaneh-Nyah, J.
Nepembe // Fifth International Conference on Intelligent system, modeling and
simulation, ISMS2014, Langkawi, Malaysia 27-29 January 2014. – P. 175-182. –
IEEE Computer Society. – ISBN-978-1-4799-3857-7.
28. Soshnikov, A. Principles of functioning of technological module for danger
estimation of combined electromagnetic field / A. Soshnikov, I. Migalyov, E.
Titov. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.11.815 // Procedia Engineering. 15th
International Scientific Conference “Underground Urbanisation as a Prerequisite
for Sustainable Development”. – 2016. – V. 165. – P. 1027-1034.
29. Ismail, A. F. Predicting Radio Frequency Radiation From Mobile Communication
Base stations / A. F. Ismail, N. I. Sidek, K. Abdullah, W. Hashim. – DOI
10.7763/IJCCE.2013.V2.231 // International Journal of Computer and
Communication Engineering. – 2013. – V. 2, no. 4. – P. 482-486.
30. Onishi, T. Radiofrequency Exposure Levels from Mobile Phone Base Stations in
Outdoor Environments and an Underground Shopping Mall in Japan / T. Onishi,

- M. Ikuyo, K. Tobita, S. Liu, M. Taki, S. Watanabe. – DOI 10.3390/ijerph18158068 // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2021. – Vol. 18(15). – P. 8068.
31. De Giudici, P. Radiofrequency exposure of people living near mobile-phone base stations in France / P. De Giudici, J.-C. Genier, S. Martin, J.-F. Doré, P. Ducimetière, A.-S. Evrard, T. Letertre, C. Ségala. – DOI 10.1016/j.envres.2020.110500 // Environmental Research. – 2021. – V. 194. – P. 110500.
 32. As, N. Electromagnetic pollution measurement in the RTE university campus area / As N., Dilek B., Şahin M. E., Karan, Y. // Global Journal on Advances in Pure & Applied Sciences. – 2014. – Vol. 03. – P. 65-72. – URL: <http://www.world-education-center.org/index.php/paas>
 33. Malathi, S. A Prediction Model for Electromagnetic Pollution Index of Multi System Base Stations / S. Malathi, G. TirumalaRao, G. Rajeswer Rao, // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2013. – V. 2, No. 12, P. 162-166.
 34. Яворский, Б. М. Курс физики. Том III. Волновые процессы, оптика, атомная и ядерная физика / Яворский Б. М., Детлаф А. А. – Москва : Высшая школа, 1972.
 35. Сивухин, Д. В. Оптика // Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – 3-е изд., стереот. – М.: Физматлит, 2005. – Т. 4. – 792 с. – ISBN 5-9221-0228-1.
 36. Vasudev, A. Electrooptical modulation of a silicon waveguide with an epsilon-near-zero material / Vasudev A., Kang J., Park J., Liu X., Brongersma M. // Opt. Exp. – 2013. – V. 21, I. 22. – P. 26-387–26-397.
 37. Tiwald, T. E. Application of IR variable angle spectroscopic ellipsometry to the determination of free carrier concentration depth profiles / Tiwald T. E., Thompson D. W., Woollam J. A., Paulson W., Hance R. // Thin Solid Films. – 1998. – P. 313–314, 661–666.

38. Kinsey, N. Nonlinear epsilon-near-zero materials explained: opinion / Kinsey N., Khurgin J. // Optical Materials Express. – 2019. – V. 9, I. 7. – P. 2793-2796.
39. Wu, J. Epsilon-near-zero photonics: infinite potentials / Wu J., Xie Z. T., Sha Y., Fu H. Y., Li Q. – DOI 10.1364/PRJ.427246 // Photonics Research. – 2021. – V. 9, I. 8. – P. 1616-1643..
40. Belyaev, V. E-Wave Interaction with the One-Dimensional Photonic Crystal with Weak Conductive and Transparent Materials / Victor Belyaev, Nikolai Zverev, Aslan Abduev, Alexander Zotov. – DOI 10.3390/coatings13040712 // Coatings. – 2023. – Vol. 13 (4). – P. 712.
41. Гладков, С. О. К теории поглощения энергии электромагнитного излучения мелкодисперсными металлическими частицами / С. О. Гладков // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, N 23.
42. Nan, Z Flexible Nanocomposite Conductors for Electromagnetic Interference Shielding / Ze Nan, Wei Wei, Zhenhua Lin, Jingjing Chang, Yue Hao. – DOI 10.1007/s40820-023-01122-5 // Nano-Micro Letters. – 2023. – Vol. 15. – P. 172.
43. Бреховских, С. М. Основы радиационного материаловедения стекла и керамики / Бреховских С. М., Викторова Ю. Н., Гринштейн Ю. Л., Ланда Л. М. – М. : Стройиздат, 1971. – 256 с.
44. Бреховских, С. М. Радиационные эффекты в стеклах / Бреховских С. М., Викторова Ю. Н., Ланда Л. М. – М. : Энергоиздат, 1982. – 182 с.
45. Петровский, Г. Т. Задачи физики и химии стекла в связи с проблемами его технологии / Г. Т. Петровский, С. М. Бреховских, Ю. Н. Кондратьев. // Физика и химия стекла. – 1975. – Т. 1, № 2.
46. Гурий Тимофеевич Петровский // Физика и химия стекла. – 2005. – Т. 31, № 6. – С. 1142-1143.
47. Дяденко, М. В. Стекла радиозащитного назначения / Дяденко М. В., Маскевич В. В. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/109798/1/fti_2018_3_019.pdf.

48. Богомолова, Л. Д. Разработка прозрачных радиозащитных стекол методом ионной имплантации / Богомолова Л. Д., Павлушкина Т. К. – 2011. – URL: <https://www.glassinfo.ru/upload/iblock/84e/fj35uwpv7i4r9kuyi8l2rgdvnymcfryp.pdf>.
49. Павлушкина, Т. К. Радиозащитное стекло / Павлушкина Т. К. – 2008. – URL: <https://www.glassinfo.ru/upload/iblock/16a/sfsgq1sv9l2cqkem1yosn6s0olm95umx.pdf>.
50. Павлушкина, Т. К. Стёкла, ослабляющие электромагнитное излучение / Павлушкина Т. К., Бабинова А. А. // Стекло и керамика. – 2020. – № 8. – С. 11-16.
51. Павлушкина, Т. К. Разработка радиозащитных стекломатериалов / Павлушкина Т. К., Бабинова А. А. // Стекло и керамика. – 2021. – № 1. – С. 20-21. – URL: <https://www.glassinfo.ru/upload/iblock/642/i06aq9dl9ty3dve4zu3t6v5o4f5oipar.pdf>.
52. Павлушкина, Т. К. Стекла, ослабляющие электромагнитное излучение / Павлушкина Т. К., Бабинова А. А. – URL: <https://www.glassinfo.ru/upload/iblock/84d/xdq0jf41gy49ge1st0s9y0vb4kct3mhi.pdf>.
53. Kim, D. G. A Highly Bendable and Durable Transparent Electromagnetic Interference Shielding Film Prepared by Wet Sintering of Silver Nanowires / D. G. Kim, J. H. Choi, D.-K. Choi, S. W. Kim. – DOI 10.1021/acsami.8b07054 // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2018 – Vol. 10 (35). – P. 29730-29740.
54. Choi, J. H. Ultra-bendable and durable Graphene–Urethane composite/silver nanowire film for flexible transparent electrodes and electromagnetic-interference shielding / J. H. Choi, K. Y. Lee, S. W. Kim. – DOI 10.1016/j.compositesb.2019.107406// Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 177. – P. 107406.
55. URL: http://www.techno.ru/emi/3_1.htm, http://www.techno.ru/emi/3_24.htm
56. EMI-shielding theory and applications. – URL: <https://hollandshielding.com/EMIshielding->

theoryapplications?gclid=EAIaIQobChMIpZCApePW8QIVltayCh0z5AkPEAAAYBCAAEgK4PfD_BwE.

57. SOLIANI EMC: Shielding products for electromagnetic interference. – URL: https://www.solianiemc.com/en/company/?gclid=EAIaIQobChMIpZCApePW8QIVltayCh0z5AkPEAAAYASAAEgIz5PD_BwE.
58. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA) The lightest shielding material in the world: Protection against electromagnetic interference // ScienceDaily. – 2020. – URL: www.sciencedaily.com/releases/2020/07/200702113703.htm.
59. Tugirumubano, A. [...] / Tugirumubano A., Vijay S. J., Go S. H., Kwac L. K., Kim H. G. // J. of Materials Research and Technology. – 2019. – Vol. 8 (1). – P. 167-172
60. Lee, J. H. [...] / J. H. Lee, D. S. Kang, S. H. Kim, M.-J. Son, J. W. Choi, D. K. Choi, J.-P. Choi. – DOI 10.1016/j.jmat.2018.08.002 // Journal of Materiomics. – 2018. – Vol. (4) 3. – P. 90-401.
61. Li, C. Interface Engineering of Titanium Nitride Nanotube Composites for Excellent Microwave Absorption at Elevated Temperature / Cuiping Li, Dan Li, Shuai Zhang, Long Ma, Lei Zhang, Jingwei Zhang, Chunhong Gong. – DOI 10.1007/s40820-024-01381-w // Nano-Micro Letters. – 2024. – Vol. 16. – P. 168.
62. Mai, T. Hollow Metal–Organic Framework/MXene/ Nanocellulose Composite Films for Giga/Terahertz Electromagnetic Shielding and Photothermal Conversion / Tian Mai, Lei Chen, Pei-Lin Wang, Qi Liu, Ming-Guo Ma. – DOI 10.1007/s40820-024-01386-5 // Nano-Micro Letters. – 2024. – Vol. 16. – P. 169.
63. Naguib, M. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 / Naguib M., Kurtoglu M., Presser V. [et al.]. – DOI 10.1002/adma.201102306 // Advanced Materials. – 2011. – Vol. 23 (37). – P. 4248–4253.

64. Liu, T.-T. In Situ Atomic Reconstruction Engineering Modulating Graphene-Like MXene-Based Multifunctional Electromagnetic Devices Covering Multi-Spectrum / Ting-Ting Liu, Qi Zheng, Wen-Qiang Cao, Yu-Ze Wang, Min Zhang, Quan-Liang Zhao, Mao-Sheng Cao. – DOI 10.1007/s40820-024-01391-8 // Nano-Micro Letters. – 2024. – Vol. 16. – P. 173.
65. Xiang, Z. Flexible and Waterproof 2D/1D/0D Construction of MXene-Based Nanocomposites for Electromagnetic Wave Absorption, EMI Shielding, and Photothermal Conversion / Zhen Xiang, Yuyang Shi, Xiaojie Zhu, Lei Cai, Wei Lu. // Nano-Micro Lett. – 2021. – Vol. 13. – P. 150.
66. Wu, Z. MXene Hollow Spheres Supported by a C–Co Exoskeleton Grow MWCNTs for Efficient Microwave Absorption / Ze Wu, Xiuli Tan, Jianqiao Wang, Youqiang Xing, Peng Huang, Bingjue Li, Lei Liu, // Nano-Micro Lett. – 2024. – Vol. 16. – P. 107.
67. Zeng, F. Analysis of the adsorption characteristics of SF₆ and its decomposition products in ZIF-67: based on GCMC and DFT / F. Zeng, K. Zhu, X. Guo, H. Li, H. Qiu, J. Tang. – DOI 10.1088/1361-6463/ad0e96 // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2023. – Vol. 57 (10) – P. 105501.
68. Wang, Y. Q. Hierarchical Ti₃C₂Tx@ZnO Hollow Spheres with Excellent Microwave Absorption Inspired by the Visual Phenomenon of Eyeless Urchins / Yan-Qin Wang, Hai-Bo Zhao, Jin-Bo Cheng, Bo-Wen Liu, Qiang Fu, Yu-Zhong Wang, // Nano-Micro Lett. – 2022. – Vol. 14. – P. 76.
69. Su, Z. Ultrafine Vacancy-Rich Nb₂O₅ Semiconductors Confined in Carbon Nanosheets Boost Dielectric Polarization for High-Attenuation Microwave Absorption / Zhe Su, Shan Yi, Wanyu Zhang, Xiaxi Xu, Yayun Zhang, Shenghu Zhou, Bo Niu, Donghui Long // Nano-Micro Lett. – 2023. – Vol. 15. – P. 183.
70. Zhang, K. Tracking Regulatory Mechanism of Trace Fe on Graphene Electromagnetic Wave Absorption / Kaili Zhang, Yuhao Liu, Yanan Liu, Yuefeng

Yan, Guansheng Ma, Bo Zhong, Renchao Che, Xiaoxiao Huang, // Nano-Micro Lett. – 2024. – Vol. 16. – P. 66.

71. Мельников, А. Прозрачные электропроводящие антиотражающие покрытия на основе ITO, SiO₂, TiO₂ / А. Мельников, П. А. Щур // Труды ВИБАМ. – 2019. – № 8. – С. 56-65.
72. Afre A. R. Transparent conducting oxide films for various applications: a review / Rakesh A. Afre, Nallin Sharma, Maheshwar Sharon, Madhuri Sharon // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2018. – Vol. 53. – P. 79-89.
73. Ginley, D. Handbook of Transparent Conductors / David Ginley, Hideo Hosono, David C. Paine. – Springer US, 2010. – 534 с.
74. Eluyemi, M. S. Synthesis and Characterization of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Thin Films Deposited by Spray Pyrolysis Method / M. S. Eluyemi, M. A. Eleruja, A. V. Adedeji, B. Olofinjana, O. Fasakin, O. O. Akinwunmi, O. O. Ilori, A. T. Famojuro, S. A. Ayinde, E. O. B. Ajayi. – DOI 10.4236/graphene.2016.53012 // Graphene. – 2016. – Vol. 5. – P. 143-154.
75. Zhou, Y. Carbon nanotube based transparent conductive films: progress, challenges, and perspectives / Ying Zhou, Reiko Azumi. – DOI 10.1080/14686996.2016.1214526 // Science and Technology of advanced Materials. – 2016. – Vol. 17, no. 1. – P. 493–516.
76. Lahey, B. PaperPhone: understanding the use of bend gestures in mobile devices with flexible electronic paper displays / Byron Lahey, Audrey Girouard, Winslow Burleson, Roel Vertegaal // CHI. – 2011. – P. 1303-1312.
77. Ma, Q. Robust Gate Driver on Array Based on Amorphous IGZO Thin-Film Transistor for Large Size High-Resolution Liquid Crystal Displays / Q. Ma, H.-H. Wang, L. Zhou, J. Fan, C. Liao, X. Guo, S. Zhang. // IEEE Journal of the Electron Devices Society. – 2019. – Vol. 7. – P. 717-721.

78. Yang, T.-T. n-type Sn substitution in amorphous IGZO film by sol-gel method: A promoter of hall mobility up to 65 cm²/V•s / Tien-Tzu Yang, Dong-Hau Kuo, Kai-Ping Tang // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2021. – Vol. 553. – P. 120503.
79. Lee, H. B. Flexible transparent conducting electrodes based on metal meshes for organic optoelectronic device applications: a review / H. B. Lee, W. Y. Jin, M. M. Ovhal, N. Kumar, J. W. Kang. – DOI 10.1039/c8tc04423f.// J. Mater. Chem. C. – 2019. – Vol. 7 (5). – P. 1087-1110.
80. Lee, J. H. ITO/Ag/ITO multilayer-based transparent conductive / J. H. Lee, Kie Y.Woo, K. H. Kim, H.-D. Kim, T. G. Kim. – DOI 10.1364/OL.38.005055 // Optics letters. – 2013. – Vol. 1 (23). – P. 5055-5058.
81. Herman, M. A. Semiconductor superlattices: physics, crystallization, and applications / Marian A. Herman. – DOI 10.1117/12.156927 // Proc. SPIE 1845, Liquid and Solid State Crystals: Physics, Technology and Applications, 15 October 1993.
82. Завьялов, Д. В. Поглощение сильной электромагнитной волны электронами сверхрешетки в квантующем электрическом поле / Д. В. Завьялов, С. В. Крючков // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, вып. 11 – С. 1355-1358.
83. Frah, M. A. A. Evaluation of electromagnetic pollution index (EMPI) emitted from multiple sources / Frah M. A. A., Belyaev V. V. – DOI.1088/1742-6596/2056/1/012057 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1 (2056). – P. 012057.
84. Frah, M. A. A. Parameters of electromagnetic pollution from different sources and their hazard impact / Frah M. A. A., Belyaev V. V. – DOI 10.1088/1742-6596/1309/1/012013. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – Vol. 1309. – P. 012013.

85. Frah, M. A. A. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials / Frah M. A. A., Pavlushkina T., Babinova A., Belyaev V., Makeev M., Osipkov A., Konopleva E., Zhachkin V., Usachev V. – DOI 10.1088/1742-6596/2056/1/012058. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1 (2056). – P. 012058.
86. Махасин, А. А. Ф. Многоисточник индекса электромагнитного загрязнения и его влияние на здоровье человека / А. А. Ф. Махасин // Перспективы науки. – 2020. – № 5 (128). – С. 18–20.
87. Махасин, А. А. Ф. Удельная скорость поглощения и оценка влияния сложного загрязнения, создаваемого электромагнитной радиоволной / А. А. Ф. Махасин // Перспективы науки. – 2020. – № 7 (130). – С. 33-35.
88. Абдуев, А. Х. Синтез многослойных структур на основе оксида цинка с периодической пространственной локализацией донорной примеси / Абдуев А. Х., Ахмедов А. К., Мурлиев Э. К., Беляев В. В., Асваров А. Ш., Фрах М. А. А. – DOI 10.18384/2310-7251-2022-3-58-73 // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. – 2022. – С. 58-73.
89. Ilican, S. Improvement of the crystallinity and optical parameters of ZnO film with aluminum doping / S. Ilican. – DOI 10.18038/btda.45168.// Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering. – 2016. – V. 17, № 1. – P. 181–190.
90. Yitzhak, N. M. Time dependence of 50 Hz magnetic fields in apartment buildings with indoor transformer stations / Yitzhak N. M., Hareuveny R., Kandel S., Ruppin R. – DOI 10.1093/rpd/ncr226 // Radiat. Prot. Dosim. – 2012. – Vol. 149. – P. 191–195. – DOI 10.1093/rpd/ncr226.
91. 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.

92. 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>.