

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ФАКУЛЬТЕТІ

**«ФИЗИКАДАҒЫ ЗАМАНАУИ ТЕНДЕНЦИЯЛАР: ҒЫЛЫМ МЕН БІЛІМ  
ИНТЕГРАЦИЯСЫ»**

Халықаралық ғылыми конференциясының материалдары

**«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ФИЗИКЕ: ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ И  
ОБРАЗОВАНИЯ»**

Материалы международной научной конференции

**«MODERN TRENDS IN PHYSICS: INTEGRATION OF SCIENCE AND EDUCATION»**

Materials of the international scientific conference

**Астана, 2024 ж**

ОӘЖ 53.(075)  
Н90

**Редакциялық кеңес:**

Е.Б. Сыдықов, С.Б.Мақыш, Ж.М.Құрманғалиева, Д.Р.Айтмағамбетов,  
Л.Т.Нуркатова, Н.Г.Айдарғалиева

**Ә43 Физикадағы заманауи тенденциялар: ғылым мен білім интеграциясы:**  
Халықаралық ғылыми конференциясының материалдары (2024 жылдың 23 ақпаны, Астана, Қазақстан). – Астана: Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ баспасы, 2024. – 555 б.

**ISBN 978-601-337-957-9**

**«ФИЗИКАДАҒЫ ЗАМАНАУИ ТЕНДЕНЦИЯЛАР: ҒЫЛЫМ МЕН БІЛІМ ИНТЕГРАЦИЯСЫ»** атты Халықаралық ғылыми-теориялық конференция материалдар жинағына кәсіптік-техникалық білім беруді жетілдіруде «Космологияның қазіргі мәселелері», «Техниканың дамуындағы физиканың рөлі», «Ядролық физика, жаңа материалдар мен технологиялар», «Радиоэлектроника мен телекоммуникацияның қазіргі даму тенденциялары», «Ғарыштық техника мен технологияларды дамытудың озық бағыттары», жоғары оқу орындарындағы кәсіби педагогика проблемалары «Университетте физика және астрономия білімінің даму тенденциялары», «Орта мектепте физиканы оқытудың тиімді педагогикалық технологиялары», «Жаратылыстану пәндері бойынша мұғалімдерді даярлау жүйесіндегі инновациялар», «Қазіргі ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» және оларды шешу әдістері мен жолдары қарастырылған мақалалар жарияланған.

ОӘЖ53.(075)

КБЖ 22.3я73

**ISBN 978-601-337-957-9**

© Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, 2024

**К.М. Маханов к.ф.-м.н.<sup>1</sup>, А.М.Асильбекова<sup>2</sup>, А.А.Құттыбек<sup>3</sup>,  
Б.Ш.Кеңесбек<sup>5</sup>, А.М. Есенғалды<sup>6</sup>.**

<sup>1</sup>*Старший преподаватель кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»  
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

<sup>2</sup>*Преподаватель кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»  
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

<sup>3</sup>*Преподаватель кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»  
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

<sup>4</sup>*Магистрант 2 курса кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»  
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,*

<sup>5</sup>*Студент 4 курса кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»  
ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,*

## **РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЧАСТИЦ ГРАФИТА ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования радиопоглощающих материалов в миллиметровом радиодиапазоне и описываются способы получения материалов. Для регистрации коэффициента поглощения объектов, собрана экспериментальная установка, состоящая из генератора (серия Г4-183М), рупорных антенн и калориметрического измерителя мощности (серия М1 - 25 М/03). Диапазон регистрируемых частот 78-118 ГГц.

В качестве основного радиопоглощающего материала использовались частицы графита различных размерностей в матрице эпоксидной смолы. Подготовка образцов осуществлялась путем перемешивания частиц графита определенной размерности с эпоксидной смолой.

Основной акцент экспериментальных работ посвящен исследованию коэффициента поглощения от угла падения. Обнаружено, что поглощающие свойства материала практически не зависят от угла падения электромагнитной волны. Установлено, что наилучшими характеристиками в исследуемом диапазоне частот обладает материал с диаметром частиц графита порядка  $d \sim 3 \text{ mm}$ .

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение (ЭМИ), сверхвысокие частоты (СВЧ), полистирол, графит, феррит, коэффициенты поглощения и отражения.

### **Введение**

Активное использование оборудования, работающего в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, в исследовательских лабораториях, в военной технике, в медицине вызвало появление ряда специфических проблем. Особенно остро проблемы отразились при использовании медицинского оборудования [1,2]. Обнаружено, что при проведении различных измерений, тестирований и других обслуживающих работ, наряду с полезными сигналами регистрируются СВЧ излучения, отраженные от окружающих предметов. Переотраженные паразитные электромагнитные излучения могут оказывать негативное действие и на человеческий организм [3,4]. Анализ отмеченных работ показал, что в большинстве случаев разработка или усовершенствование СВЧ технологий, независимо от области применения нацелено на исключение их негативного влияния на человека [1].

Известно, что наиболее распространенным методом защиты является экранирование [5,6]. Для экранирования чаще всего используются различные металлические экраны (медь, сталь), углеводородные волокна, проводящие полимеры, полимерные композиты и т. д. Данный вид защиты наряду с преимуществами, обладает и недостатками [7,8], проявляющимися изменением параметров пере-отраженной волны, «прозрачностью» большинства материалов для электромагнитного излучения (ЭМИ) в широком диапазоне. Для устранения отмеченных недостатков, при разработке методов защиты необходимо учитывать параметры экранирующих материалов, их электрические и диэлектрические свойства [9].

В медицинском оборудовании источниками электромагнитного излучения являются приборы, используемые в хирургии, томографии, гипертермии, при плазменном нагреве и т. д. [2].

При эксплуатации аппаратуры негативному воздействию излучения подвергается как медицинский персонал, так и посетители. В зонах с повышенной интенсивностью ЭМИ физиологическое состояние организма человека нарушается. Причиной является изменение характеристик собственных энергетических полей (биополей). При этом, различные органы человека могут изменять свои природные параметры функционирования. Подобные изменения наблюдаются и при воздействии на человека паразитных излучений. К примеру, в [10], отмечено, что при постоянном воздействии паразитного ЭМИ, оказывается негативное влияние на митотическую активность эпителиоцитов крипт слизистой оболочки тощей кишки и сосудистого эндотелия. Авторы отмечают, что после выхода из опасной зоны защитные механизмы здорового организма в состоянии частично или полностью устранить возникшие изменения. Однако при длительном или систематическом пребывании в местах с повышенным уровнем ЭМИ, такие изменения неизбежно накапливаются. Зачастую эти изменения приобретают стабильный болезненный характер различной тяжести и симптоматики.

В работе [11] авторами представлены результаты клинко-физиологических исследований. Полученные данные свидетельствуют о риске развития неблагоприятных изменений сердечно-сосудистой, нервной, гематологической и иммунной систем.

Результатом продолжительного влияния электромагнитных полей даже относительно слабого уровня могут быть раковые заболевания, изменение поведения, потеря памяти.

Медицинский персонал, обслуживающий медицинское оборудование, входит в особую группу риска [12-14]. Одним из эффективных способов защиты от воздействия ЭМИ является разработка и усовершенствование материалов, поглощающих радиоволны в широком частотном диапазоне.

Целью предлагаемого исследования является разработка материала, поглощающего ЭМИ в диапазоне 78 – 118 ГГц. Разрабатываемый материал должен удовлетворять соотношению «высокая эффективность защиты – невысокие затраты на изготовление».

Для достижения поставленной цели были определены задачи, связанные с регистрацией коэффициента поглощения электромагнитного излучения в следующей последовательности:

- «чистой» подложки без поглощающего материала;
- поглощающего материала, нанесенного на поверхность подложки;
- поглощающего материала в зависимости от толщины нанесенного слоя;
- в зависимости от угла ориентации поглощающей поверхности.

Объектом исследования являются частицы графита, встроенные в матрицу связующего материала. Выбор объекта исследования обусловлен наличием большого количества работ, посвященных исследованию радиофизических параметров графита. Для получения частиц графита нами была использована фарфоровая ступка. В качестве связующего использовали эпоксидную смолу марки ЭД-20 ГОСТ 10587-84.

В настоящее время существуют поглощающие материалы на основе пенополистирола (EPS) [15-18]. Материал изготавливается и реализуется в виде сплошных пластин определенного размера. При необходимости экранирования сложных участков: острые углы, места стыков и соединений, округленные участки, образуются щелевые отверстия, что снижает защитные свойства.

В данной работе представлены результаты исследования защитных свойств материалов на основе эпоксидной смолы с добавлением частиц графита. Раствор смолы с частицами графита может быть нанесен на любую поверхность сплошной пленкой. При этом появление щелевых отверстий исключается.

#### **Методика подготовки объектов исследования и техника эксперимента**

Подготовка объектов исследования проводилась по стандартной технологии подробное описание которой представлено в [4-10].

Для выполнения исследований была собрана экспериментальная установка, состоящая из излучателя, приемника и блока поворотного механизма. Внешний вид измерительной установки представлен на рисунке 1. В состав излучателя входят: генератор (Г4-183М), аттенюатор (АП-20), блок поворотного механизма и волноводный выход с рупорной антенной. В качестве приемника сигнала был использован калориметрический измеритель (М1-25М) с рупорной антенной на входе. В блок поворотного механизма встроен шаговый двигатель, управление которым осуществлялось с помощью компьютерной программы.

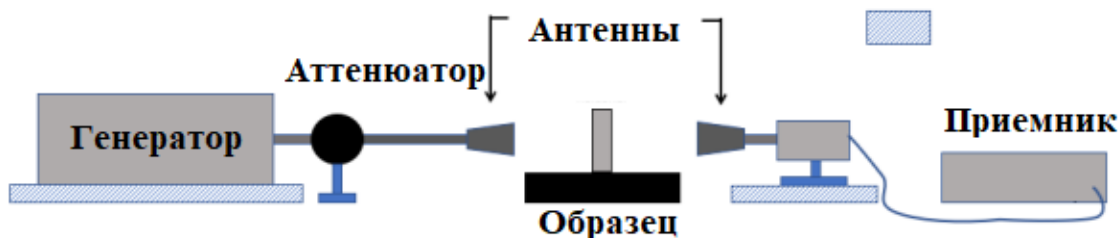


Рисунок – 1  
Схема экспериментальной установки

Регистрация ЭМИ осуществлялась в диапазоне 78 – 118 ГГц с шагом 2 ГГц. Диапазон ослабления ЭМИ аттенюатором соответствовал диапазону 5 – 25 дБ с шагом 5 дБ. Объект исследования располагался между антенной излучателем и антенной приемником. Расстояние от объекта исследования до антенн соответствовало 5 см.

Для определения геометрических размеров образцов при измерении коэффициентов отражения и экранирования на экспериментальной установке снимались диаграммы распределения электромагнитного поля. Это позволило выбрать размер исследуемого образца (9,5\*6 см) и судить о величине дифракционных поправок, уровне сигнала нежелательных отражений и просачиваний энергии в приемную антенну.

Снятие зависимости диаграммы направленности рассеянного поля от угла падения электромагнитной волны (ЭМВ) выполнено путем перемещения приемника вокруг исследуемого образца при неизменном положении последнего.

Применение рупорных антенн с достаточно малым уровнем боковых лепестков и хорошим согласованием с передающим трактом обеспечило минимальную многократную связь антенн.

### Результаты и их обсуждение

Предварительно, все измерения были проведены с использованием аттенюатора АП-20 при разных уровнях ослабления первоначальной мощности ЭМИ (25дБ - 5дБ), с шагом 5дБ. Было установлено, что при ослаблениях от 20дБ и выше уровень регистрируемого сигнала падает до 0. Поэтому, в данной работе представлены результаты измерений при первичном ослаблении сигнала от 15дБ до 5дБ. Измерения проводились при разных углах (90, 30, 60) положения исследуемого образца относительно падающей волны. Во всех образцах толщина эпоксидной смолы одинаковая и соответствует 1,7 мм. Различными являются только размеры частиц графита.

На начальном этапе, была проведена работа по определению коэффициента пропускания «чистого» образца. На рисунке 2 представлены результаты измерений коэффициента пропускания и соответственно поглощения стеклянной подложки с нанесенной на поверхность эпоксидной смолой.

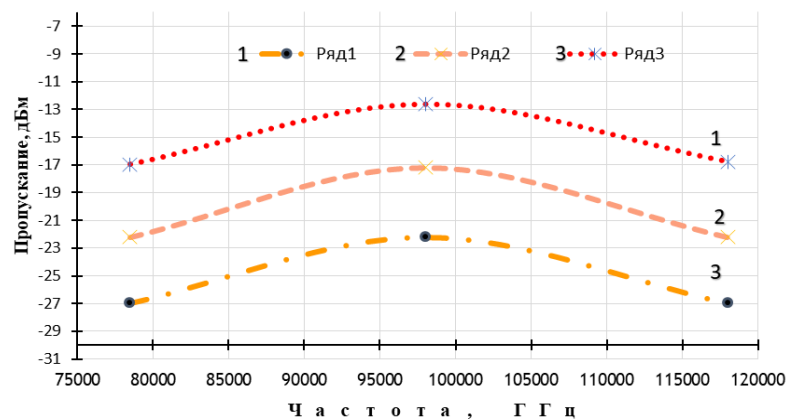


Рисунок – 2  
Коэффициенты пропускания «чистого» образца

Результаты данного измерения показали, что при полной мощности ЭМИ (5дБ, кривая 1) стекло и эпоксидная смола, ослабляют сигнал примерно на 20%. В последующих измерениях, с частицами графита, данное значение будет учитываться. Что позволит нам более точно определять вклад размерности частиц графита на степень ослабления ЭМИ. Необходимо также отметить, что для «чистого» образца, угол положения относительно падающей волны не оказывал существенного влияния.

Исследованию влияния размерности частиц графита на уровень ослабления мощности ЭМИ посвящено много работ [19-22]. Установлено, что в целом наблюдается тенденция к уменьшению размерности частиц.

Как уже было отмечено выше, при разработке методов защиты необходимо учитывать электрические и диэлектрические свойства экранирующих материалов. Результаты, полученные авторами в [23] показали, что коэффициенты отражения и поглощения существенно зависят от угла падения ЭМВ и плоскости ее поляризации. Также авторами отмечено, что с увеличением длины электромагнитной волны, поглощающие свойства материалов значительно ухудшаются.

Регистрация коэффициента поглощения при разных углах падения ЭМВ проводилась с использованием поворотного механизма на основе шагового двигателя под управлением с компьютерного приложения. Точностью поворота составляет 1 градус.

На рисунке 3 представлены результаты регистрации мощности ЭМИ прошедшего через образец с частицами графита размерностью порядка  $d=3$  мм.

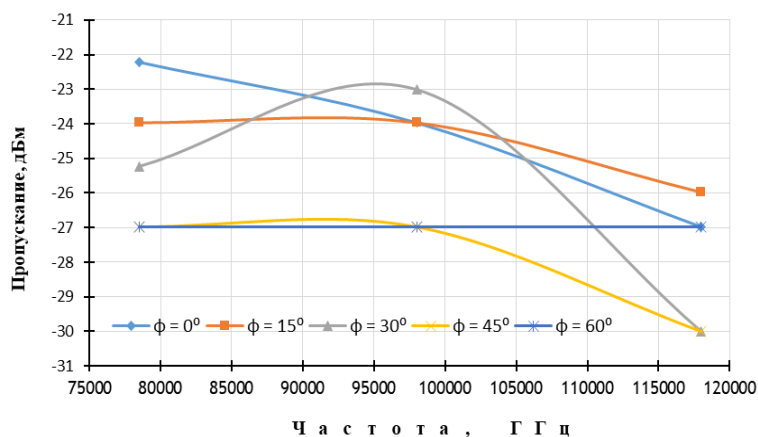


Рисунок – 3  
Коэффициенты пропускания образца с частицами графита диаметром 3 мм

В целом, общий вид представленных кривых подтверждает заключение авторов [23]. Как мы видим, при  $\phi=0^\circ$  зависимость от частоты сохраняется линейной, увеличение угла

падения ( $\varphi=15^\circ$ ) приводит к отклонению от линейной зависимости. Максимальное отклонение наблюдается при  $\varphi=30^\circ$ . При дальнейшем увеличении угла ( $\varphi=45^\circ$ ) изгиб кривой уменьшается и уже при  $\varphi=60^\circ$ , вновь приобретает линейный характер.

Из проведенного анализа видно, что на низких частотах (78-85 ГГц) минимальное ослабление сигнала наблюдается при нормальном падении ЭМВ. На высоких частотах, для случаев, когда  $\varphi=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  степень ослабления сигнала, прошедшего через образец увеличивается. При этом, для случая, когда  $\varphi=30^\circ$  интенсивность ЭМИ прошедшего через образец исследования в диапазоне 78-95 ГГц растет. При облучении частотой 95 ГГц и более резко снижается. На рисунке 4 представлена частотная зависимость коэффициента поглощения ЭМИ прошедшего через образец при разных значениях ослабления первоначального излучения. Для всех случаев ослабления, наблюдается рост интенсивности ЭМИ в частотном диапазоне 75-100 ГГц.

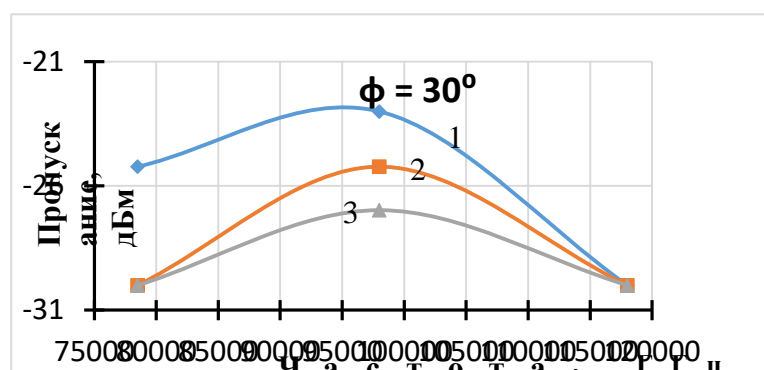


Рисунок – 4  
Частотная зависимость коэффициентов пропускания образца при разном ослаблений: 1- 5дБ, 2- 10дБ, 3- 15дБ

Таким образом, по результатам исследования поглощающего материала с частицами графита диаметром порядка  $d\sim 3\text{mm}$  было обнаружено «нестандартное» поведение кривой поглощения при угле падения  $\varphi=30^\circ$ . Для выяснения природы наблюдаемого эффекта необходимо проведение дальнейших исследований, связанных с угловой зависимостью коэффициентов отраженной волны.

#### Выводы и заключение.

Предложенный подход к исследованию и разработке поглощающих материалов на основе жидкой эпоксидной смолы с добавлением графита, может обеспечить надежное покрытие экранирующих поверхностей любой сложной формы. Установлено, что поглощающие свойства материала практически не зависят от угла падения электромагнитной волны, за исключением случая, когда  $\varphi=30^\circ$ . Наилучшими характеристиками в исследуемом диапазоне частот обладает материал с диаметром частиц графита порядка  $d\sim 3\text{mm}$ .

Проведенные исследования показали, что изготовление поглощающих материалов на основе эпоксидной смолы с добавлением частиц графита, позволяет получить покрытие, необходимое для создания защиты биологической системы от воздействия СВЧ излучений.

#### Список использованной литературы:

1. Черный А.П. Современное состояние исследований влияния электромагнитных излучений на организм человека / А.П. Черный, В.В. Никифоров, Д.И. Родькин, В.И. Ноженко // Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах, - 2013. - № 2/2013 (2).
2. Бараночников М. Л. Магнитоэлектроника. Т. 1 / М. Л. Бараночников. –М: ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
3. Chow E. Y. Wireless and the study of RF propagation through ocular tissue for development of implantable sensors / E. Y. Chow, C. L. Yang, Y. Ouyang, A. Chlebowski, P. P. Irazoqui, W. J.

- Chappell // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 2011. – Vol. 59, Issue 6. – P. 2379–2387. doi: 10.1109/tap.2011.2144551
4. Guy A. W. Analyses of electromagnetic fields induced in biological tissue by thermographic studies on equivalent phantom models / A. W. Guy // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1971. – Vol. 19, Issue 2. – P. 205–214. doi: 10.1109/tmtt.1968.1127484
  5. Боруш В. А. Электромагнитные излучения. Метод и средства защиты / В. А. Боруш, Т. В. Борботько, А. В. Гусинский и др.; под ред. П. М. Лынькова. – Мн., 2003. – 398 с.
  6. Капура И. В. Анализ методов и средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия мощных электромагнитных излучений / И. В. Капура, Б. В. Бакуменко // Системы обработки информации. – 2010. – № 6. – С. 87–90.
  7. Лыньков Л. М. и др. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2004. – Т. 2, № 5. – С. 152–167.
  8. Wallace, J. L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations / J. L. Wallace // IEEE Transactions on Magnetics. – 1993. – Vol. 29, Issue 6. – P. 4209–4214. doi: 10.1109/20.280862
  9. Alu A. Causaliti relations in the homogenization of metamaterials / A. Alu, A. D. Yaghjian, R. A. Shore, M. G. Silveirinha // Physical Review B. – 2011. – Vol. 84, Issue 5. – P. 1–16. doi: 10.1103/physrevb.84.054305
  10. Шибкова Д. З. Эффекты воздействия электромагнитных излучений на разных уровнях организации биологических систем / Д. З. Шибкова, А. В. Овчинникова // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 5.
  11. Яшин С. А. Система регистрации собственных низкоинтенсивных электромагнитных полей на организм человека / С. А. Яшин // Вестник новых медицинских технологий. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 158.
  12. Александров, Ю. А. Исследование уровня электромагнитных излучений от некоторых технических устройств / Ю. А. Александров, А. А. Остапенко, А. В. Генинов // Вестник Приазовского государственного университета. – 2014. – Вып. 28. – С. 188–199.
  13. Алмазова, О. Б. Микроволны изменяют сопротивляемость живых организмов по отношению к ионизирующей радиации / О. Б. Алмазова, Б. Г. Емец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 4, № 9 (58). – С. 19–23.
  14. Федорович, С. В. Влияние различных видов излучений на здоровье работников [Текст] / С. В. Федоров и др. – Проблемы общественного здоровья и здравоохранения, 2004. – С. 111.
  15. Погорелая, Л. М. Защита медицинского и промышленного персонала от воздействия патогенных полей с использованием матричного экрана / Л. М. Погорелая и др. // Вестник новых медицинских технологий. – 2014. – Т. 21, № 1.
  16. Лыньков, Л. М. и др. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2004. – Т. 2, № 5. – С. 152–167.
  17. Wallace, J. L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations / J. L. Wallace // IEEE Transactions on Magnetics. – 1993. – Vol. 29, Issue 6. – P. 4209–4214. doi: 10.1109/20.280862
  18. Alu, A. Causaliti relations in the homogenization of metamaterials / A. Alu, A. D. Yaghjian, R. A. Shore, M. G. Silveirinha // Physical Review B. – 2011. – Vol. 84, Issue 5. – P. 1–16. doi: 10.1103/physrevb.84.054305
  19. Д.С. Быченко, А.О. Плющ, Г.В. Горохов, В.С. Быченко, П.П. Кужир, С.А. Максименко / Поглотители СВЧ излучения на основе гофрированных композитов с углеродными волокнами // Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 12.
  20. Быченко, В. С. Материал для снижения радиолокационной заметности летательных аппаратов на основе углеродных структур / В. С. Быченко, В. Н. Степаненко, Д. С. Быченко // Перспективные материалы и технологии : материалы международного симпозиума, Витебск, 22-26 мая 2017 г. : в 2 ч. / УО "ВГТУ", ГНУ "Институт технической акустики НАН Беларуси". - Витебск, 2017. - Ч. 2. - С. 294-297.



21. Крюков А.В., Еремеев А.С. / Новые радиопоглощающие гибкие материалы на основе углеродной матрицы с различными синтетическими наполнителями и оценка их поглощающих свойств в СВЧ диапазоне // Радиоэлектроника. РЭНСИТ. –2020. -том 12. -№ 3. –С. 335-340.
22. Kuzhir P., Paddubskaya A., Bychanok D., Nemilentsau A., Shuba M., Plusch A., Maksimenko S., Bellucci S., Coderoni L., Micciulla F., Sacco I., Rinaldi G., Macutkevic J., Seliuta D., Valusis G., Banys J. / Microwave probing of nanocarbon based epoxy resin composite films: Toward electromagnetic shielding // Thin Solid Films 519 (2011) 4114–4118.
23. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. / Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн // ФИП. ФИП. PSE, 2003, том 1, № 2, -vol. 1, -№ 2.

**Ж. К. Кадырова**

*Студент 2 курса магистратуры по специальности «Моделирование и проектирование радиоэлектронных аппаратур» в ЕНУ им. Л.Н.Гумилева (Казахстан, г. Астана) и по курсу «Комплексное проектирование микросистем средствами Mentor Graphics» (Институт НМСТ) в МИЭТ (Россия, г. Москва)*

### **ПРОБЛЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ КОРПУСИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА УРОВНЕ ПОДЛОЖКИ (FO-WLP)**

**Аннотация:** Технология корпусирования интегральных микросхем на уровне подложки (FO-WLP) привлекает все большее внимание благодаря своим преимуществам малого форм-фактора, более высокой плотности ввода-вывода, экономичности и высокой производительности для широкого спектра применений. Однако деформация пластин по-прежнему остается одной из важнейших проблем, которую необходимо решить для успешного выполнения последующих процессов корпуса FO-WLP. Были рекомендованы решения для уменьшения деформации пластин. Интегральные микросхемы (ИМС) на уровне подложки (FO-WLP) становятся все более распространенными в современной электронике благодаря своей компактности и высокой производительности. Однако в процессе корпусирования таких микросхем возникают серьезные проблемы деформации, которые могут привести к снижению надежности и долговечности устройства. В данной работе рассматриваются основные причины деформации в процессе FO-WLP и методы их решения. Анализируются различные технологии корпусирования и их влияние на механические свойства микросхем. Предлагаются практические подходы к минимизации деформации в процессе производства и эксплуатации ИМС FO-WLP для обеспечения их стабильной работы и долговечности.

**Ключевые слова:** интегральная микросхема, FO-WLP (англ. Fun-Out Wafer-Level Package – технология корпусирования интегральных микросхем на уровне подложки), ЭФК (эпоксидный формовочный компаунд), RDL (англ. Redistribution layers – слои перераспределения).

**Введение.** До настоящего времени технология корпусирования FO-WLP все еще сталкивается с множеством трудностей, включая деформацию пластин, сдвиг матрицы и выступание, а также проблемы с надежностью на уровне платы и т.д. Среди этих проблем деформация пластин является одной из ключевых, которую необходимо решить для успешного завершения последующих процессов. В рамках данного исследования предложена методика снижения деформации пластин в различных процессах путем анализа геометрии, выбора материалов и оптимизации процесса. Размер используемого корпуса составляет 15 мм × 15 мм, включая два чипа размером 8 мм × 9 мм и два чипа размером 2 мм × 3 мм. Общая толщина корпуса составляет 200 мкм при использовании структур RDL с обеих сторон.