

УДК 537.86:538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГРАФЕН, МЕТАМАТЕРИАЛЫ, КОМПОЗИТЫ) НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ-ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Жильский К.А., Жильский Н.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрено влияние графена, метаматериалов и композитов на характеристики СВЧ-датчиков влажности и диэлектрической проницаемости, проанализированы физические принципы их работы и показана возможность повышения чувствительности, точности и стабильности сенсоров за счёт применения современных материалов.

Ключевые слова. СВЧ-датчики, метаматериалы, оксид графена, композитные материалы, датчики влажности, диэлектрическая проницаемость, чувствительность сенсоров, локализация электромагнитного поля, резонансная частота.

Исключительно важными сегодня являются технологии, позволяющие быстро и точно неразрушающим методом определять физические характеристики веществ. К таким параметрам относится влажность и диэлектрическая проницаемость, которые широко используются при контроле качества материалов, мониторинге технологических процессов, а также в системах экологического и промышленного контроля. В этой связи особый интерес вызывают датчики, работающие в сверхвысокочастотном диапазоне, поскольку они позволяют регистрировать даже небольшие изменения свойств среды за счёт взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым материалом.

Кроме того, такие датчики обладают высокой скоростью отклика, возможностью бесконтактного измерения и небольшой чувствительной зоной, что делает их востребованными в современных автоматизированных системах контроля, где особенно актуальным становится применение новых функциональных материалов, таких как *графен, метаматериалы и различные композитные структуры*.

Датчики на основе метаматериалов (ММ) представляют собой не что иное, как комбинацию различных материалов, таких как пластик, проводящие элементы и керамика, для создания периодической структуры, которая может возбуждаться с помощью электромагнитного поля. В своем простейшем виде датчик на основе ММ создается путем размещения диэлектрического материала между линией передачи и проводящим слоем (рисунок 1). Периодическая структура формируется методом травления проводящего слоя, что впоследствии способствует возникновению резонанса индуцированного тока на проводящей поверхности. Как правило, метаповерхность изготавливается путем нанесения плоского проводящего периодического рисунка на диэлектрическую подложку. В большинстве опубликованных исследований в качестве диэлектрической подложки использовался стеклотекстолит FR4 [1]. Однако в последнее время для достижения улучшенных характеристик применяются и различные другие диэлектрические подложки, такие как металлофталоцианины, подложки из оксидов металлов и прочие.

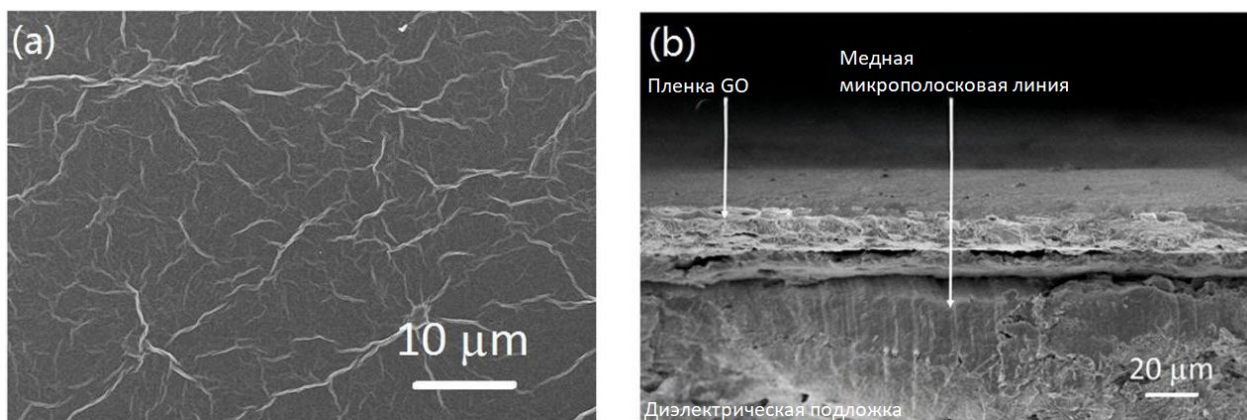


Рисунок 1 – Поперечное сечение сенсорной структуры

Для физической реализации такого управления в СВЧ-диапазоне применяются ММ. Двумя классическими топологиями, реализующими этот принцип, являются разрезные кольцевые резонаторы (SRR) и их аналоги (CSRR), электродинамические модели которых представлены на рисунке 2.

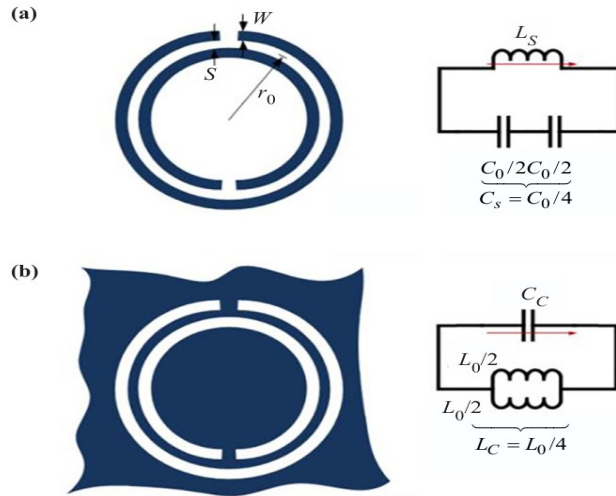


Рисунок 2 – Электрическая эквивалентная схема структуры SRR (а); электрическая эквивалентная схема структуры CSRR (б)

Разрезные кольцевые резонаторы (SRR). Эти устройства представлены на рисунке 2(а) в виде проводящей структуры в форме кольца или квадрата, расположенной на диэлектрической подложке. На определенном участке по длине этой структуры имеется разрыв или щель. Для ее возбуждения используется параллельная структуре линия передачи, благодаря чему магнитное поле направлено перпендикулярно проводящей плоскости. В результате непрерывного изменения магнитного поля в кольцевой структуре наводится ток. Электрическая эквивалентная схема сопоставима с контуром LC-резонатора, который имеет собственную резонансную частоту.

Резонансные методы измерения широко применяются в сверхвысокочастотных датчиках благодаря высокой чувствительности к изменениям электромагнитных параметров среды [2]. Работа таких устройств основана на использовании резонаторных структур, в которых электромагнитное поле усиливается на определённой, резонансной частоте [3]. Значение этой частоты определяется геометрией резонатора и электромагнитными свойствами среды, находящейся в зоне действия поля. Резонансная частота для разрезного кольцевого резонатора (SRR) может быть выражена как

$$f_{srr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

$$C = C_g + C_s, \quad (2)$$

где L – эквивалентная индуктивность резонаторной структуры; C_g – ёмкость зазора; C_s –поверхностная ёмкость.

$$C_g = \epsilon_{eff} \left(\frac{hw}{g} \right) + \epsilon_{eff} (h + g + w), \quad (3)$$

$$C_s = 2\epsilon_{eff} \left(\frac{(h+w)}{\pi} \ln \left(\frac{4r}{g} \right) \right), \quad (4)$$

$$L = \mu_0 R_m \left(\ln \left(\frac{8R_m}{h+w} \right) - 0.5 \right), \quad (5)$$

$$R_m = r + w/2 \quad (6)$$

где r — радиус; h — высота; w — ширина; g — щелевой зазор проводящей структуры.

Из выражения для резонансной частоты и соответствующих формул очевидно, что резонансную частоту можно изменять путем варьирования таких параметров, как щелевой зазор, ширина и радиус кольца. Наряду с этим резонансная частота также зависит от диэлектрической проницаемости материала, находящегося в непосредственной близости от структуры. Таким образом, чувствительность структур выражается:

$$S = \frac{\Delta f_{res}}{\Delta \epsilon}, \quad (7)$$

$$Q = \frac{f_{res}}{FWHM}, \quad (8)$$

где S – чувствительность датчика; Δf_{res} – сдвиг резонансной частоты; $\Delta\epsilon$ – изменение диэлектрической проницаемости; Q – добротность; f_{res} – резонансная частота; FWHM — ширина пика на полувисоте (от англ. Full Width at Half Maximum).

Из анализа характеристик резонатора четко прослеживается, что основным механизмом работы СВЧ-датчика является фиксация изменений электромагнитных свойств среды, находящейся в зоне действия поля. Фундаментальной величиной, описывающей эти свойства, выступает диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическая проницаемость является одной из ключевых характеристик вещества, определяющих его взаимодействие с электромагнитным полем [4]. В сверхвысокочастотном диапазоне диэлектрическая проницаемость напрямую влияет на параметры распространения электромагнитных волн, включая скорость распространения, фазовый сдвиг и уровень потерь энергии.

Особое значение данный параметр имеет при анализе влажности материалов. Молекулы воды обладают выраженным дипольным моментом и способны активно ориентироваться во внешнем электрическом поле. В результате даже небольшое увеличение содержания влаги приводит к заметному росту диэлектрической проницаемости вещества. По этой причине изменение влажности материала сопровождается изменением его электромагнитных характеристик. Когда исследуемый материал (MUT — Material Under Test) вступает в электромагнитное взаимодействие со структурой, происходит сдвиг резонансной частоты [5]. Чем больше этот сдвиг, тем выше чувствительность датчика. В зависимости от области применения исследуемый материал (MUT) по-разному взаимодействует с резонирующей структурой.

Для ненагруженного состояния датчика, когда в его чувствительной зоне отсутствует исследуемый диэлектрик, начальная резонансная частота f_0 определяется его собственной эквивалентной индуктивностью и ёмкостью:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{UMS}C_{UMS}}}, \quad (9)$$

где L_{UMS} и C_{UMS} — это индуктивность и емкость ненагруженного резонатора.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{UMS}(C_{UMS}+C_{LMS})}}. \quad (10)$$

В СВЧ-датчиках этот эффект используется для измерения влажности различных веществ. При взаимодействии исследуемого материала с электромагнитным полем сенсорной структуры происходит изменение распределения поля и смещение резонансной частоты устройства. Величина этого сдвига позволяет оценить диэлектрическую проницаемость среды и, следовательно, определить содержание влаги в материале.

Если в область чувствительного электромагнитного поля помещается исследуемый материал, его диэлектрическая проницаемость изменяет электрическую ёмкость резонаторной системы. В этом случае ёмкость принимает значение:

$$C = C_0 + C_m, \quad (11)$$

где C_0 — собственная ёмкость резонатора; а C_m — добавочная ёмкость, обусловленная присутствием исследуемого материала.

В качестве основного измерительного параметра СВЧ-датчика используется сдвиг резонансной частоты:

$$\Delta f = f_0 - f_1 \quad (12)$$

Чем больше изменение диэлектрических свойств среды, тем значительнее сдвиг резонансной частоты. Качество и предел обнаружения таких резонансных измерений напрямую зависят от материала, с которым взаимодействует исследуемая среда. В связи с этим первостепенную научную и практическую значимость приобретает исследование влияния **новых материалов (графена, метаматериалов, композитов)** на характеристики СВЧ-устройств. Использование сред с такими уникальными электрофизическими свойствами позволяет многократно усилить резонансный отклик датчика. При этом безусловным лидером среди базовых функциональных покрытий является графен.

Графен — это уникальный материал, представляющий собой один слой атомов углерода, выстроенных в виде правильной шестиугольной решётки. Несмотря на простоту структуры, его физические

свойства сильно отличаются от обычных проводников. Это связано с тем, что электроны в графене ведут себя необычно: в энергетической структуре материала есть так называемые точки Дирака, в которых валентная зона и зона проводимости соприкасаются.

Вблизи этих точек движение носителей заряда описывается линейной зависимостью энергии от импульса:

$$E = \hbar v_F |k|, \quad (13)$$

где E – энергия электрона; k – волновой вектор; \hbar – приведённая постоянная Планка; v_F – скорость Ферми (порядка 10^6 м/с).

Графен обладает высокой подвижностью несущей и низким уровнем шума, что позволяет использовать его в качестве канала в полевом транзисторе. Немодифицированный графен не имеет энергетической запрещенной зоны, что делает его непригодным для цифровой электроники. Однако модификации (например, графеновые нановолокна) создали потенциальные возможности для использования в различных областях электроники. Были построены графеновые транзисторы, которые контролируются химически, и другие, которые контролируются напряжением. Графен проявляет ярко выраженную реакцию на перпендикулярные внешние электрические поля, потенциально образуя полевые транзисторы (FET). В статье 2004 года были задокументированы FETs с коэффициентом включения-выключения ≈ 30 при комнатной температуре. В статье 2006 года было объявлено о полностью графеновом плоском фэт с боковыми затворами [6]. Их приборы показали изменения на 2% при криогенных температурах. Первый топостробированный FET (коэффициент включения-выключения графеновые нановолокна могут оказаться в целом способными заменить кремний в качестве полупроводника.

Благодаря такой зависимости электроны в графене ведут себя как квазичастицы с нулевой эффективной массой, что обеспечивает чрезвычайно высокую подвижность носителей заряда.

Электропроводность графена может быть выражена через концентрацию носителей заряда и их подвижность:

$$\sigma = qn\mu, \quad (14)$$

где σ — электрическая проводимость; q — заряд электрона; n — концентрация носителей заряда; μ — их подвижность. Высокие значения подвижности (до (10^5) см²/В·с) позволяют графеновым слоям эффективно взаимодействовать с электромагнитными полями в сверхвысокочастотном диапазоне.

В СВЧ-сенсорах важную роль играет также поверхностная проводимость графена. Для высоких частот она описывается комплексной величиной:

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega), \quad (15)$$

где ω — угловая частота электромагнитного поля. Комплексная проводимость определяет как потери энергии, так и реактивные свойства графенового слоя.

На рисунке 3 видно, что слои оксида графена (GO) и максена (MXene) переплетаются друг с другом,

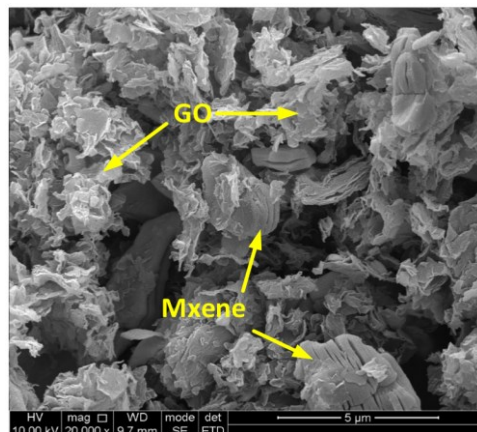


Рисунок 3 – Изображение композита GO@MXene, полученное методом сканирующей электронной микроскопии

образуя увеличенную удельную площадь поверхности для адсорбции молекул воды. Такое интенсивное поглощение влаги напрямую меняет электромагнитные параметры среды.

Высокая удельная поверхность, квантовые эффекты переноса заряда и высокая электропроводность делают графен особенно чувствительным к изменениям окружающей среды. Благодаря этим свойствам графеновые покрытия способны существенно повышать чувствительность СВЧ-сенсоров влажности и датчиков диэлектрической проницаемости материалов.

Как было показано ранее, отклик СВЧ-датчика на изменение влажности обусловлен изменением эквивалентной емкости системы [5]. Однако в традиционных резонаторах электрическое поле рассеивается в большом объеме, что снижает общую чувствительность. Метаматериалы решают эту проблему за счет эффекта субволновой локализации ближнего поля (near-field confinement) [1]. С физической точки зрения, геометрия метаматериала позволяет сжать макроскопическое СВЧ-поле в микроскопические емкостные зазоры. Управление электромагнитными свойствами сводится к геометрическому конструированию этих зазоров. Например, эквивалентная емкость щели (C_g) классического кольцевого резонатора строго зависит от его топологии:

$$C_g = \epsilon_{eff} \left(\frac{hw}{g} \right) + \epsilon_{eff}(h + g + w), \quad (16)$$

где h — толщина подложки; w — ширина проводника; g — ширина зазора (щели), а ϵ_{eff} — эффективная диэлектрическая проницаемость среды.

Например, уменьшение размеров резонаторов приводит к увеличению резонансной частоты, а изменение ширины зазоров влияет на ёмкость и, следовательно, на чувствительность к внешней среде. Это делает метаматериалы особенно удобными для сенсорных приложений, где требуется высокая чувствительность к малым изменениям параметров среды.

Еще одним материалом для создания сверхвысокочастотных сенсоров являются композитные материалы. В контексте сверхвысокочастотных сенсоров такие материалы позволяют целенаправленно управлять электромагнитными характеристиками структуры за счёт комбинации свойств отдельных компонентов.

С физической точки зрения основное преимущество композитов связано с возможностью регулирования эффективной диэлектрической проницаемости. Она определяется не только свойствами исходных материалов, но и их объемным соотношением. В простейшем случае эффективная проницаемость может быть оценена, как

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 V_1 + \epsilon_2 V_2, \quad (17)$$

где ϵ_1, ϵ_2 — диэлектрические проницаемости компонентов, V_1, V_2 — их объемные доли.

В СВЧ-датчиках композитные материалы часто используются в качестве подложек или чувствительных покрытий. Изменяя состав композита, можно влиять на распределение электромагнитного поля в сенсорной структуре, а также на величину потерь.

Оптимизация параметров сенсора достигается подбором структуры композита: размера частиц, их распределения и типа матрицы. Это позволяет повысить чувствительность, расширить диапазон измерений и улучшить стабильность работы устройства.

Использование композитных материалов также обеспечивает механическую прочность, термическую устойчивость и технологичность изготовления сенсоров. Благодаря этому они находят широкое применение в современных СВЧ-системах контроля параметров среды, где требуется сочетание высокой точности и надёжности.

В заключительной части работы целесообразно вновь обратиться к ключевой идее — повышению эффективности сверхвысокочастотных датчиков за счёт более глубокого понимания физических процессов и внедрения новых функциональных материалов. Рассмотрение физических механизмов взаимодействия электромагнитного поля с веществом позволило раскрыть природу работы сенсоров и выявить факторы, ограничивающие их характеристики.

Список использованных источников:

1. *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena* / J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins., W.J. Stewart // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1999. – Vol. 47.
2. *Основы радиоэлектроники* / В.М. Борздов. — Минск: БГУ, 2002. — 196 с.
3. *Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства* / Д.В. Гололобов, В.Б. Кирильчук. — Минск: БГУИР, 2003. — 120 с.
4. *Физика твердого тела* / К.Н. Васильев. — М.: Юрайт, 2021. — 410 с.
5. *СВЧ-электроника и сенсорные технологии* / Ю.В. Гуляев— М.: Наука, 2019. — 280 с.
6. *The effects of graphene nanostructures on mesenchymal stem cells* / Y. Talukdar {et. al.] // *Biomaterials*, 2014.– 35 (18). – P. 4863–77.

UDC 537.86:538.9

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF NEW MATERIALS (GRAPHENE, METAMATERIALS, COMPOSITES) ON THE CHARACTERISTICS OF MICROWAVE SENSORS FOR MOISTURE AND DIELECTRIC PERMITTIVITY

Zhilskiy K.A., Zhilskiy N.A., students

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus*

Khramovich E.M. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Annotation. The influence of graphene, metamaterials, and composites on the characteristics of microwave sensors for moisture and dielectric permittivity is considered, with analysis of their physical operating principles and demonstration of improved sensitivity, accuracy, and stability through the use of advanced materials.

Keywords. Microwave sensors, metamaterials, graphene oxide, composite materials, humidity sensors, dielectric constant, sensor sensitivity, electromagnetic field localization, resonant frequency.