

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ТОНКОСЛОЙНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ЧЕРНИЛАХ

В. И. Калинин¹, А. А. Ефремов², Ю. В. Кохтина², А. В. Нисан²,
Н. И. Павлов², М. В. Весник¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
²ЗАО «НИИИТ» (ГК Остек)

Статья получена 21 мая 2014 г.

Аннотация. Исследованы частотные и радиационные характеристики антенн из проводящих чернил, напечатанных на бумаге и пленке полиимида. Размеры антенн выбраны из условия работы в диапазоне частот 2 - 3 ГГц. Исследование включает моделирование и тестирование нескольких образцов антенн на обоих типах подложек. Показано, что эффективность излучения антенн из чернил с толщиной проводящего слоя около 0.5 микрон на пленке полиимида сравнима с эффективностью антенны из медной фольги на той же подложке. Однако эффективность антенн на бумажной подложке оказалась сравнительно низкой из-за более высоких омических потерь в печатных проводниках. Расчётные и измеренные характеристики согласования хорошо соответствуют друг другу для всех исследованных образцов. Сделан вывод о перспективности дальнейшего развития и практических приложений.

Ключевые слова. Инновационная технология, проводящие чернила, печатные антенны, массовое производство, системы радиочастотной идентификации.

Abstract. Frequency and radiation characteristics of conductive ink-based antennas printed on a paper sheet and a polyimide film are investigated. The sizes of antennas are selected such that the working frequency range is between 2 and 3 GHz. The study includes modeling and testing of several antenna samples on both substrate types. It is shown that the radiation efficiency of antennas printed by conductive ink with the thickness of the ink layer around 0.5 micron on the polyimide film is comparable with

the radiation efficiency of an antenna made from a copper foil of the same size on the same substrate. However the efficiency of printed ink antennas on the paper substrate turned out to be rather low because of higher ohm losses in the printed conductors. The simulated and measured matching characteristics correspond to each other fairly well for all tested samples. It is concluded that further development and applications are very promising.

Keywords. Innovative technology, conductive ink, printed antennas, mass production, systems of radio-frequency identification.

Введение

В настоящее время технологии печати проводящими чернилами на разных подложках уделяется большое внимание. Печать чернилами оказывается более гибким, дешевым и экологически чистым методом изготовления различных элементов электронных схем в сравнении с традиционной микрополосковой технологией. Кроме того, в качестве подложки для чернил можно использовать различные подложки на основе целлюлозы, являющейся возобновляемым ресурсом.

Среди исследований в этой области за последние годы появились работы по исследованию печатных антенн на проводящих чернилах (см., например, [1-5]). Эти работы мотивированы тем, что излучатели на чернилах можно успешно использовать в ряде приложений. Например, в [1] предложено использовать сверхширокополосные антенны на проводящих чернилах в диапазоне частот вплоть до 10 ГГц для широкополосных беспроводных сенсорных сетей нового поколения. В [2] описано применение печатной технологии для изготовления двухчастотных двухслойных микрополосковых антенн как демонстрацию возможностей изготовления многослойных микроволновых устройств, состоящих из последовательно печатаемых слоев разных материалов, в частности, из

проводящих чернил и пленки полиимида. Полученная этим способом антенна имеет двухчастотный отклик в диапазоне 4.8 – 5.8 ГГц. В работе [3] описан метод проектирования печатной антенны на бумажной подложке, основанный на высокоточном измерении электрических характеристик бумаги и проводящих чернил. Спроектированная на основе такого подхода антенна была изготовлена методом флексографической печати для работы в Wi-Fi диапазоне. Флексография является методом прямой печати, при которой форма, покрытая чернилами, переносит изображение непосредственно на печатную поверхность. Фотополимерная форма является гибкой, от нее и название этого метода печати. Антенна имеет центральную частоту 2.45 ГГц и эффективность 72%. Проектирование и применение печатных антенн на проводящих чернилах в системах радиочастотной идентификации (RFID) описано в [4-5]. Это направление является, вероятно, наиболее перспективным для широкого применения на практике инновационной технологии проводящих чернил, так как при этом становится возможным организовать массовое производство печатных излучателей на гибких дешевых подложках в качестве антенн тэгов (меток). В частности, в [4] представлена печатная антенна тэга на PET подложке, имеющая рабочую полосу 0.75 – 1.05 ГГц и усиление 1.9 дБ. Такая полоса перекрывает все рабочие диапазоны RFID, принятые в Европе, Америке и Азии. В статье [5] дается анализ стоимости различных коммерчески доступных проводящих чернил, имеющих разную электрическую проводимость. Определяется минимальный требуемый объем разных типов чернил для достижения максимальной эффективности антенн. Показано, что расход чернил можно сократить для чернил с максимальной проводимостью. Однако при этом стоимость печатных антенн может быть не самой малой, так как чернила с большей проводимостью являются и более дорогими.

В большинстве публикаций описываются антенны на чернилах с толщиной проводящего слоя порядка нескольких микрон, вплоть до толщины скин-слоя (10-

11 микрон). Такие толщины требуют нескольких проходов принтера и увеличенного расхода чернил, что удорожает напечатанное устройство. Поэтому интерес представляет исследование возможности создания эффективных и дешевых печатных излучателей с толщиной чернильного слоя порядка полмикрона, которые не требуют увеличенного объема чернил и позволяют в большей степени использовать преимущества новой технологии. В таких субмикронных проводящих слоях ток распределен по толщине почти равномерно, и это надо учитывать при моделировании устройств.

Конкретно, в данной работе мы исследуем излучатели, напечатанные чернилами на основе наночастиц серебра, на двух типах подложек: на пленке полиимида и на бумаге. При этом излучатели на бумаге представляют большой практический интерес с учетом прогресса в технологии производства бумаги улучшенного качества [6] и возможности использования технологии печати чернилами в массовом производстве гибких и дешевых тэгов в системах RFID.

2. Моделирование

В качестве печатной антенны было предложено исследовать квадратный кольцевой (петлевой) излучатель резонансного типа с периметром, примерно равным длине волны, настроенный на работу в диапазоне частот 2...3 ГГц. В качестве материала подложек были выбраны бумага и полиимид. Оба типа подложек могут использоваться для печати на них антенн из проводящих чернил. Кроме того, для сравнения была смоделирована также обычная антенна с медным проводником.

2.1. Антенна на подложке из бумаги

Модель антенны показана на рис.1. Внешний размер кольца 36 мм, внутренний - 30 мм, ширина проводника кольца 3мм. Небольшой отрезок печатной двухпроводной линии, соединяемый с коаксиальным кабелем на торце, служит для возбуждения антенны.

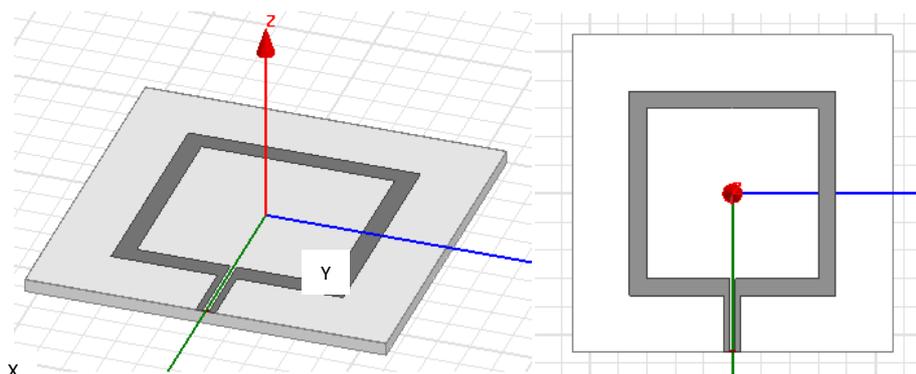


Рис.1. Модель печатной кольцевой антенны из чернил на бумаге

Проводящим слоем является тонкий слой чернил толщиной примерно 0.5 микрона, что в несколько раз меньше толщины скин-слоя в рассматриваемом диапазоне частот. При этом ток внутри проводящего слоя распределен почти равномерно по его толщине. С учетом этого при моделировании область внутри тонкого проводника также включена в область решения. Проводимость проводящего слоя в модели антенны $\sigma = 1.4 \cdot 10^6$ Сим/м (соответственно скин-слой $\Delta = 8.5$ микрона) задана, исходя из измеренного удельного сопротивления (в ом/квадрат) напечатанного отрезка линии на бумажной подложке. Электрические характеристики бумаги, заданные в модели: $\epsilon = 3$, $\text{tg} \delta = 0.07$ [1]. Толщина бумаги является параметром и при моделировании варьируется в некоторых пределах. Предполагается, что для придания определенной жесткости антенне бумага с напечатанным излучателем расположена на пластинке пенопласта Rohacell 31HF толщиной 2 мм и с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1.1$. Слой двустороннего скотча, которым бумага приклеивается к пенопласту, в модели не учитывается.

Зависимость рассчитанного коэффициента отражения от частоты для трех разных толщин бумаги представлена на рис. 2. Видим, что изменение толщины бумаги в указанных пределах приводит лишь к небольшому сдвигу резонансной частоты и незначительному изменению величины отражения в минимуме кривой согласования.

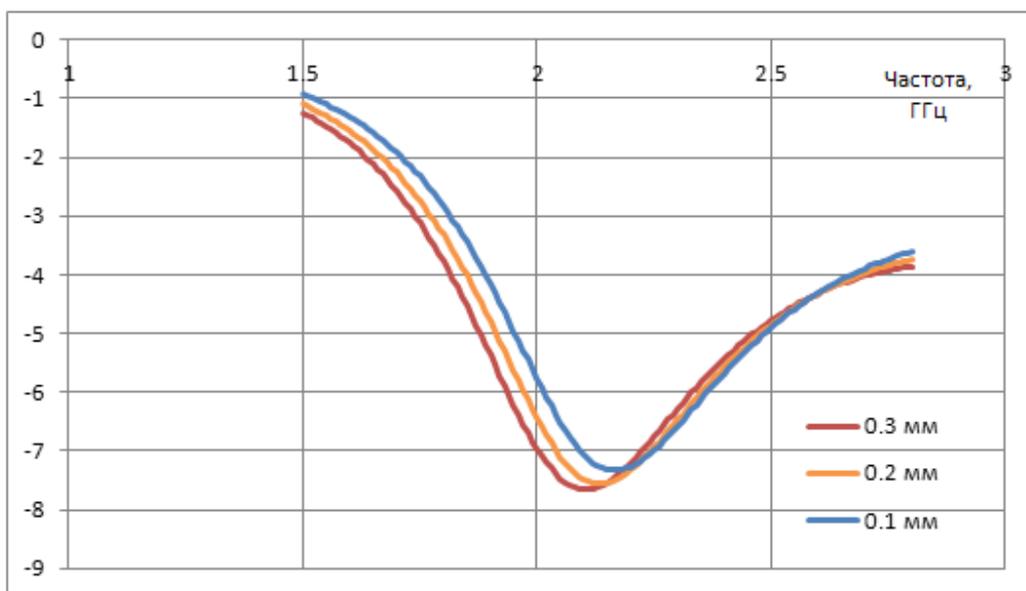


Рис.2. Частотная зависимость коэффициента отражения антенны на рис. 1 для разных значений толщины бумажной подложки

На рис.3 показаны пространственная диаграмма направленности излучения и ее сечения в главных плоскостях $\varphi=0$ (XOZ) и $\varphi=90^\circ$ (YOZ) для антенны на рис. 1, напечатанной на бумажной подложке толщиной 0.1 мм.

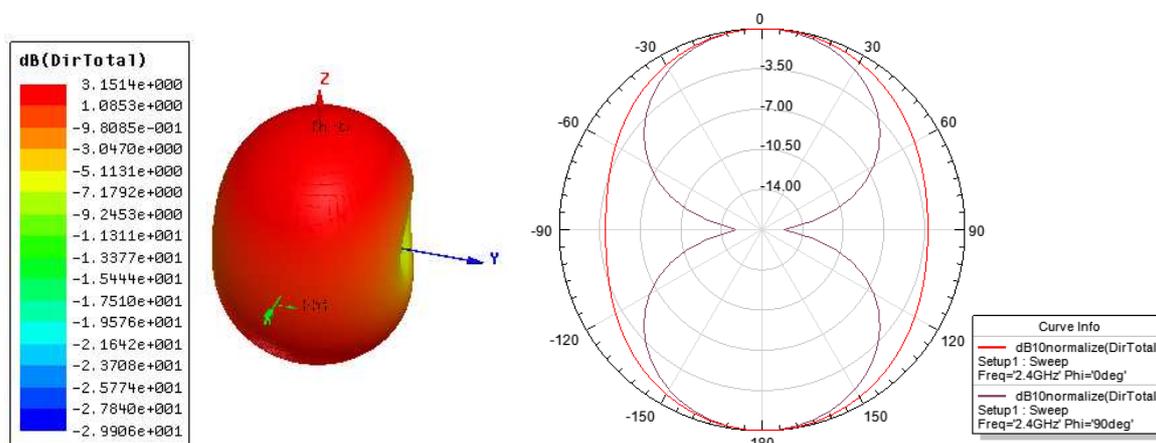


Рис.3. Пространственная диаграмма направленности излучения и ее сечения в двух главных плоскостях на частоте 2.4 ГГц

Направление максимального излучения совпадает с нормалью к плоскости антенны ($\theta=0$ и $\theta=180^\circ$). На данной частоте максимальная направленность 2.07 или 3.15 дБ. Расчет других радиационных характеристик показывает, что при этом

максимальное значение усиления в том же направлении без учета рассогласования равно 1.15 или 0.61 дБ, а эффективность излучения составляет 0.55. Таким образом, низкий коэффициент усиления антенны в сравнении с ее направленностью обусловлен небольшой радиационной эффективностью, которая, в свою очередь, определяется низкой проводимостью чернил на бумажной подложке и сравнительно большими омическими потерями в данной антенне.

В дополнение, на рис. 4 представлены рассчитанные значения эффективности печатных антенн для тех же толщин бумаги: эффективность согласования, эффективность излучения и полная эффективность (кпд), определяемая как произведение первых двух. При этом эффективность согласования определяется из частотных характеристик отражения на рис.2, а эффективность излучения рассчитывается на основе характеристик излучения соответствующих антенн.

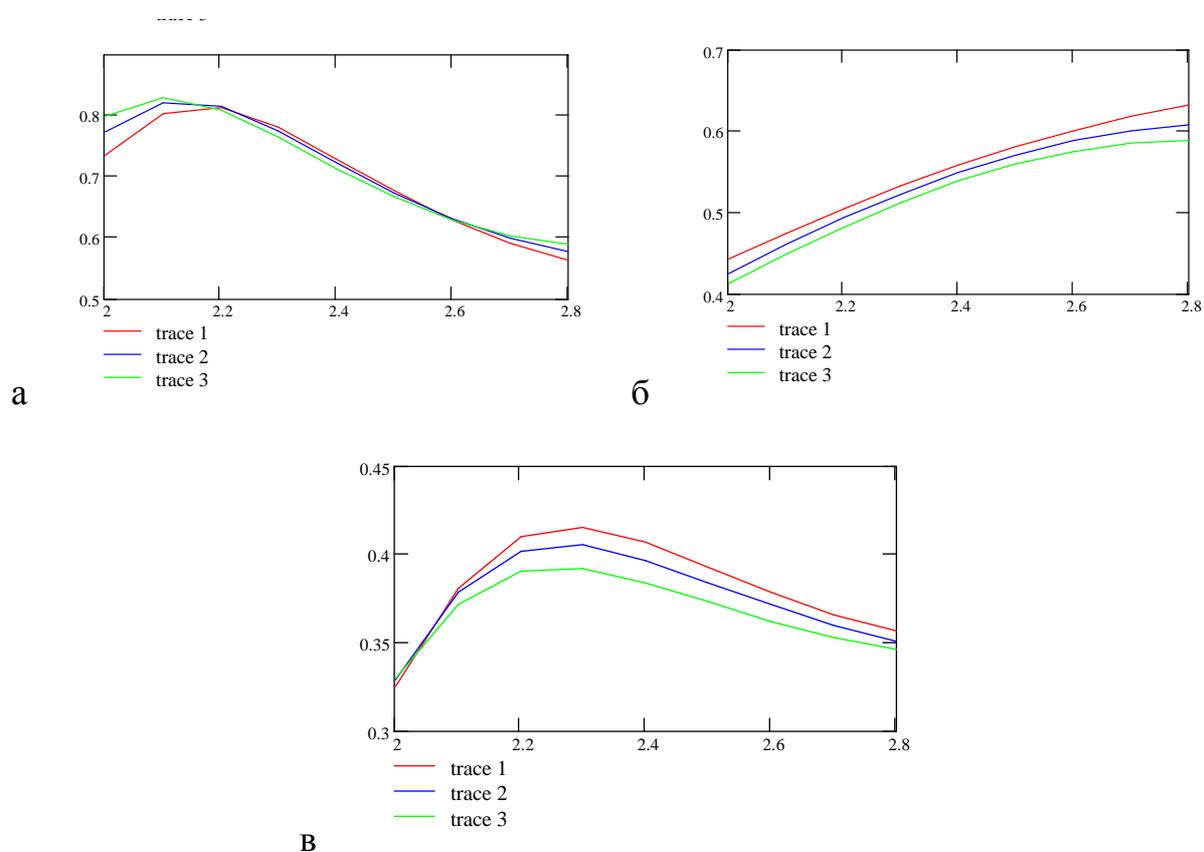


Рис.4. Эффективность печатных антенн для разных толщин бумажной подложки в

полосе частот: а – эффективность согласования, б – эффективность излучения, в – полная эффективность (trace 1 – толщина 0.1мм, trace 2 – толщина 0.2мм, trace 3 – толщина 0.3мм)

Следует отметить, что эффективность печатной антенны на бумаге слабо зависит от ее толщины в рассмотренных пределах от 0.1 до 0.3 мм. Низкая полная эффективность (около 0.4) обусловлена, в основном, низкой проводимостью чернил и большими омическими потерями в антенне. Для увеличения проводимости следует использовать подложку более высокого качества. Кроме того, для повышения КПД антенны следует улучшать ее согласование в рабочей полосе частот.

2.2. Антенна на подложке из полиимида

В качестве более эффективного излучателя была предложена антенна из тех же проводящих чернил и примерно с той же толщиной проводящего слоя 0.5 микрона, напечатанная на пленке полиимида. Модель антенны показана на рис.5. Она имеет тот же дизайн и размеры, что и антенна на бумаге, рассмотренная выше. Электрические параметры полиимида, заданные в модели: $\epsilon = 3.5$, $\text{tg}\delta = 0.008$. Толщина подложки принимает два значения: 0.125 мм и 0.25 мм. Проводимость слоя чернил $\sigma = 1.6 \cdot 10^7$ Сим/м (соответственно скин-слой $\Delta = 2.5$ микрона) в этом случае выше, что обусловлено его более низким удельным сопротивлением на данной подложке.

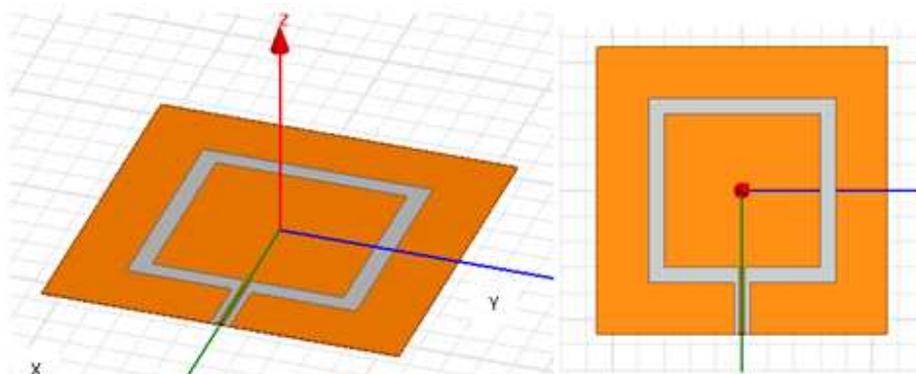


Рис.5. Модель печатной кольцевой антенны из чернил на полиимиде

Зависимость рассчитанного коэффициента отражения от частоты для двух толщин пленки полиимида представлена на рис. 6. Как и в случае бумажной подложки, изменение толщины слоя полиимида в данном случае приводит лишь к небольшому сдвигу резонансной частоты и незначительному изменению величины отражения в минимуме кривой согласования.

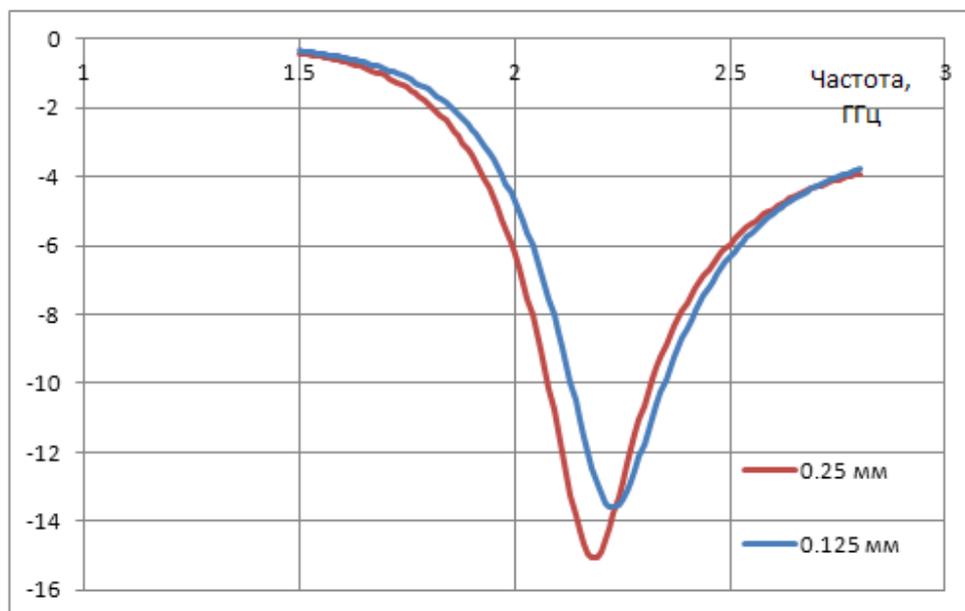


Рис.6. Частотная зависимость коэффициента отражения антенны на рис.5 для двух значений толщины подложки из полиимида

На рис.7 показаны пространственная диаграмма направленности излучения и ее сечения в двух главных плоскостях $\varphi=0$ (XOZ) и $\varphi=90^\circ$ (YOZ) для антенны, напечатанной на пленке полиимида толщиной 0.125 мм. По форме и значениям направленности излучения эта диаграмма практически та же, что и на рис.3.

Максимальная направленность 2.08 или 3.18 дБ на частоте 2.4 ГГц. Расчет других радиационных характеристик показывает, что при этом максимальное значение усиления антенны без учета рассогласования равно 1.91 или 2.80 дБ, а эффективность излучения составляет 0.92. Таким образом, данная антенна имеет более высокий коэффициент усиления благодаря более высокой эффективности излучения. Как отмечалось выше, это обусловлено более высокой проводимостью

чернил на подложке из полиимида.

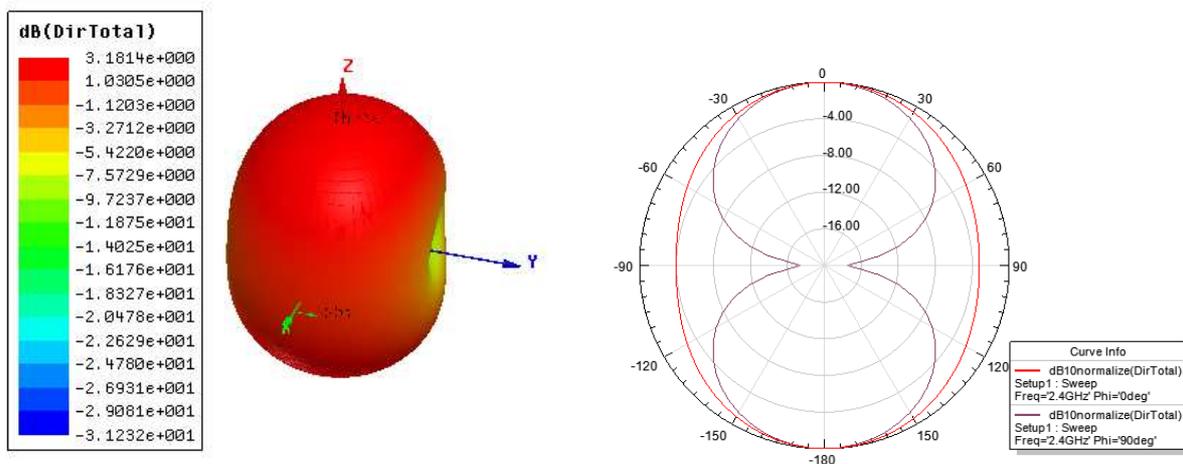


Рис.7. Диаграмма направленности излучения и ее сечения в двух главных плоскостях на частоте 2.4 ГГц

На рис. 8 представлены рассчитанные составляющие эффективности печатной антенны на полиимиде. В этом случае эффективность излучения почти не зависит от толщины подложки, а полная эффективность выше для более толстой подложки за счет более высокой эффективности согласования.

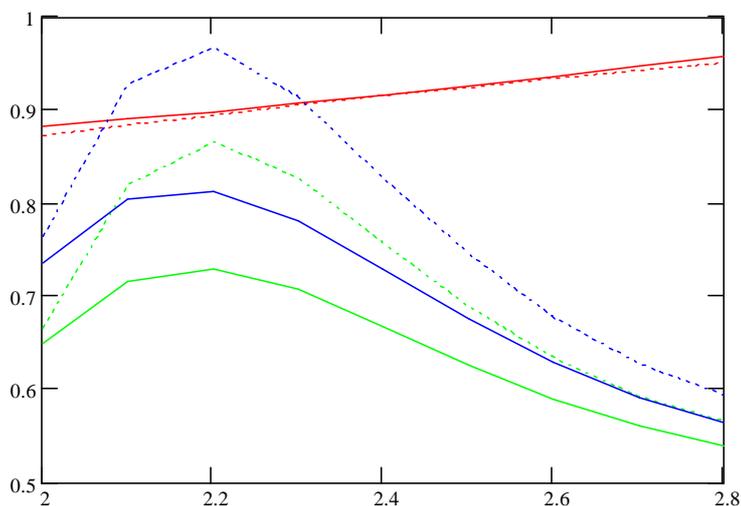


Рис.8. Эффективность антенны на рис. 5 в диапазоне частот для двух толщин подложки из полиимида: красный цвет – эффективность излучения, синий цвет – эффективность согласования, зеленый цвет – полная эффективность. Сплошные линии – толщина 0.125 мм, штрихи – толщина 0.25мм

Сравнивая с рис. 4, отмечаем, что печатная антенна на полиимиде почти в 2 раза более эффективная, чем аналогичная печатная антенна на бумаге.

2.3. Антенна из медной фольги на полиимиде

В качестве антенны с эффективностью излучения, близкой к 1, была рассмотрена кольцевая антенна с обычным проводником из меди на той же подложке из полиимида. Антенна имеет те же размеры, что и рассмотренные выше печатные антенны на чернилах. В качестве проводника служит самоклеющаяся медная фольга с толщиной медного слоя около 40 микрон и клеевым слоем около 60 микрон, которая наклеивается на подложку из полиимида. Модель антенны показана на рис. 9. Для моделирования в заданном диапазоне частот диэлектрическая проницаемость и потери в акриловом клеевом слое заданы соответственно $\epsilon=3$, $\text{tg}\delta=0.4$. (Следует отметить, что имеющиеся данные об электрических характеристиках акрилового клея относятся к сравнительно низким частотам порядка 1 МГц, и поэтому остается вопрос о его характеристиках в исследуемом диапазоне 2-3 ГГц. С учетом этого принятые в нашей модели характеристики клеевого слоя следует рассматривать лишь как предполагаемые и ориентировочные).

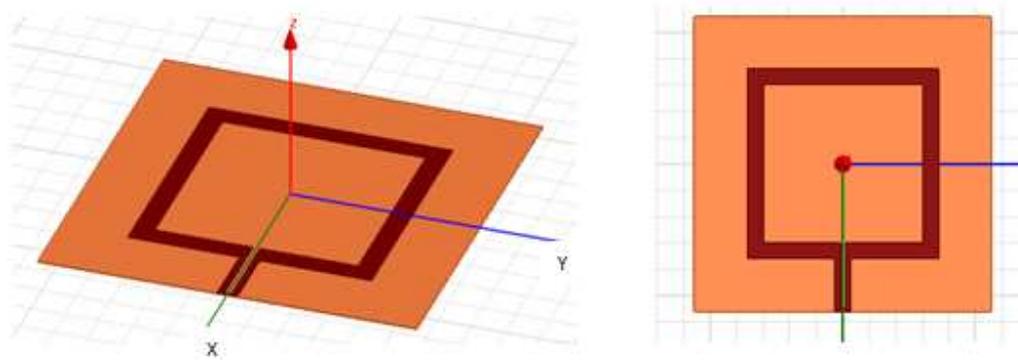


Рис. 9. Модель антенны из медной фольги на пленке полиимида

Частотная зависимость коэффициента отражения для двух толщин пленки полиимида представлена на рис. 10. На рис.11 показаны пространственная

диаграмма направленности излучения и ее сечения в двух плоскостях для антенны на подложке толщиной 0.125 мм на частоте 2.4 ГГц. На данной частоте

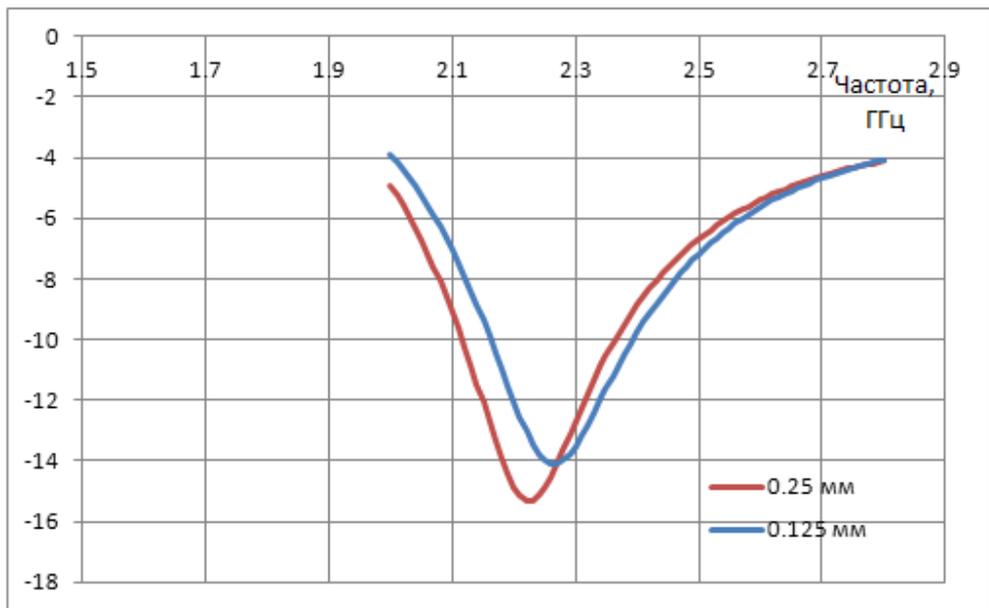


Рис.10. Коэффициент отражения антенны на рис. 9 для двух толщин пленки полиимеида

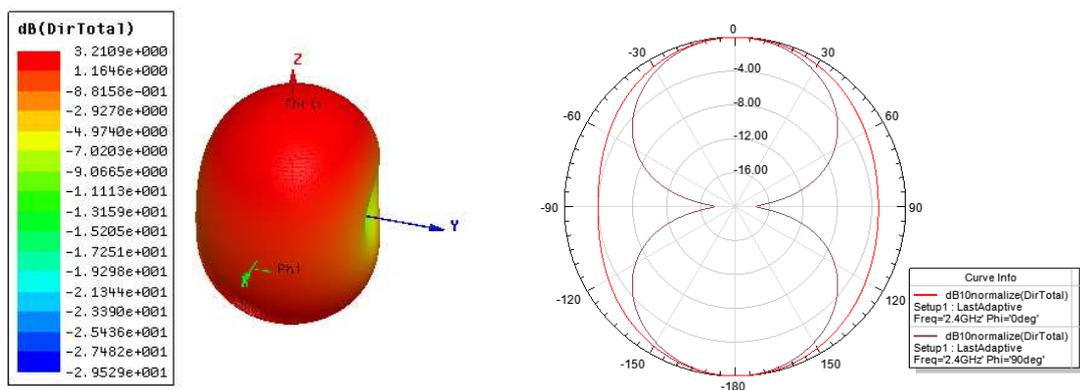


Рис. 11. Диаграмма направленности излучения антенны на рис. 9 для толщины подложки 0.125 мм на частоте 2.4 ГГц

максимальное значение направленности 2.095 или 3.21 дБ. Расчет других характеристик излучения показывает, что при этом максимальное значение усиления антенны без учета рассогласования равно $2.06 = 3.14$ дБ, а эффективность

излучения составляет 0.98. На рис. 12 представлены рассчитанные значения составляющих эффективности антенны из медной фольги на пленке полиимида 0.125 мм.

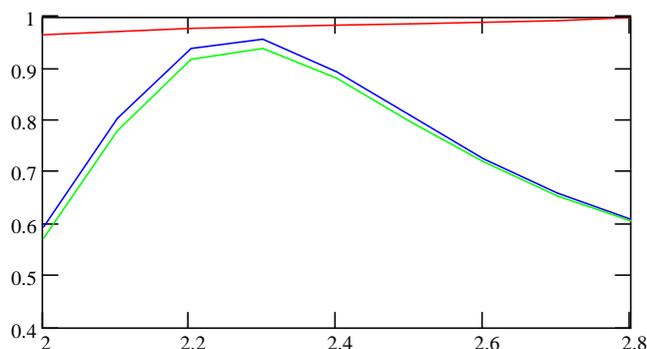


Рис.12. Эффективность антенны на рис. 9 в диапазоне частот: красный цвет – эффективность излучения, синий цвет – эффективность согласования, зеленый цвет – полная эффективность

Сравнивая рис.12 и рис. 8, можем заметить, что при заданных параметрах модели эффективность излучения печатной антенны из проводящих чернил на пленке полиимида немного меньше в сравнении с антенной из медной фольги на той же подложке. Таким образом, результаты моделирования показывают, что печатные антенны из чернил с толщиной проводящего слоя порядка 0.5 микрона на тонких пленках полиимида являются вполне эффективными излучателями в исследуемом диапазоне частот.

3. Изготовление и тестирование прототипов

В рамках данного исследования были изготовлены и протестированы несколько образцов антенн, напечатанных серебряными чернилами на подложках двух типов: на пленке полиимида толщиной 0.125 мм и на бумаге толщиной 0.1 мм. Для иллюстрации на рис. 13 представлены фото двух образцов, изготовленных на подложках из полиимида и бумаги. Пленка полиимида имеет некоторый остаточный радиус изгиба, но, предположительно, эта деформация не

оказывает заметного влияния на характеристики напечатанных на ней антенн, которые, в основном, сохраняют ожидаемые характеристики, полученные из плоской модели. Антенны на бумаге наклеивались на пластинки пенопласта марки Rohacell31 HF толщиной 2 мм для придания им необходимой механической жесткости в процессе тестирования. Для сравнения была изготовлена также антенна из медной фольги на подложке из полиимида (рис.14).

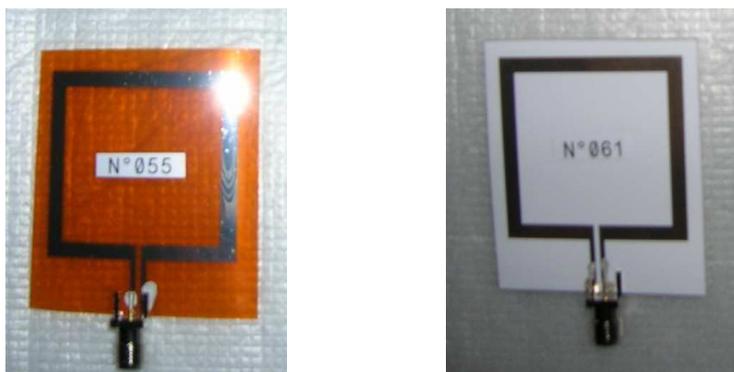


Рис.13. Образцы печатных антенн из проводящих серебряных чернил на пленке полиимида (слева) и на бумаге (справа)



Рис.14. Образец антенны из медной фольги на пленке полиимида

Для присоединения антенн к коаксиальному кабелю и измерительному устройству использовались SMA разъемы типа SP-2150 фирмы Radiolab. Надо отметить, что в отсутствие симметрирующего устройства (балуна) для данного типа излучателя с двухпроводной балансной возбуждающей линией, в принципе, может существовать эффект затекания токов на кабель и его влияние на характеристики излучателя. Однако во всех проведенных тестах было отмечено

достаточно слабое влияние этого эффекта на частотную характеристику в рабочей полосе частот в окрестности резонансной частоты. Влияние токов на кабеле становилось заметным только за пределами рабочей полосы излучения. Известно, что подавить токи на кабеле в некоторой полосе частот можно путем использования т.н. четвертьволнового стакана (дресселя), который располагается на подводящем кабеле вблизи разъема. Однако для целей данной работы было достаточно испытать антенны с присоединенным разъемом, как показано на рис. 13, 14, и без использования дополнительного приспособления-дресселя на коаксиальном кабеле. Все изготовленные образцы были протестированы с точки зрения их частотных характеристик. В силу их подобия и в целях сокращения объема статьи здесь представлены результаты только для одного образца каждого типа. На рис. 15 показаны измеренная и расчетная характеристики для печатной антенны на бумаге, а на рис. 16 – на пленке полиимида. Кроме того, на рис. 17 приведены соответствующие характеристики для антенны из медной фольги. Измерения проводились с помощью СВЧ анализатора цепей Agilent Technologies №5242A (ЗАО «Акметрон»).

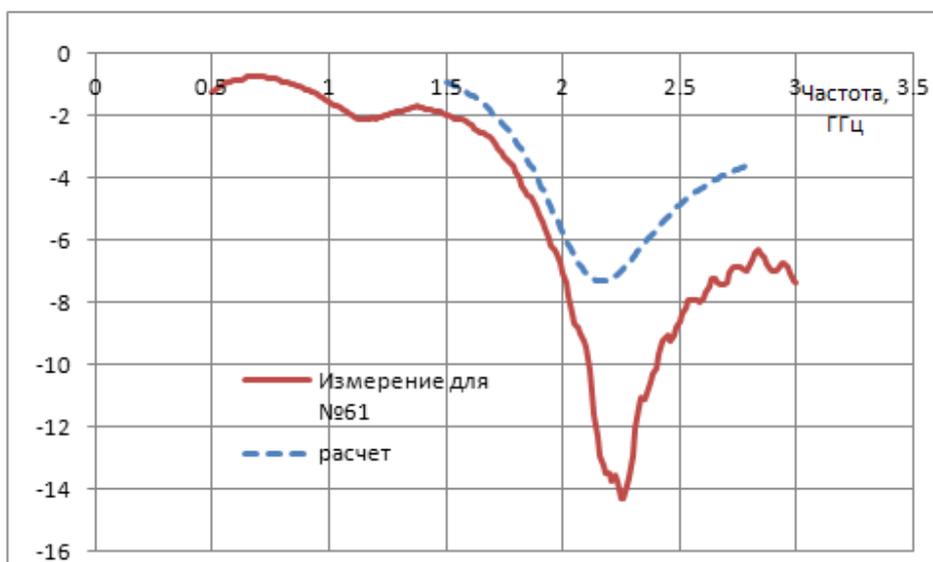


Рис.15. Характеристика согласования для печатной антенны на бумаге

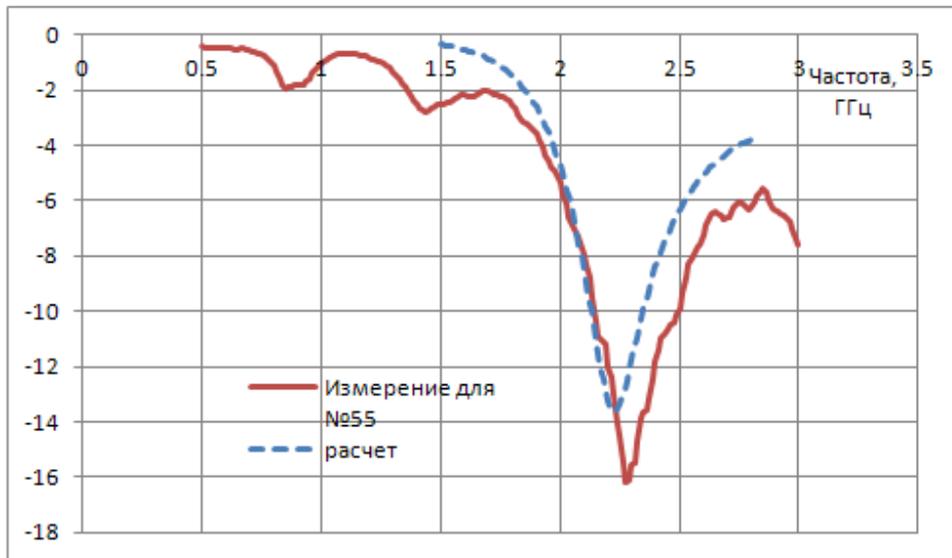


Рис.16. Характеристика согласования для печатной антенны на пленке полиимида

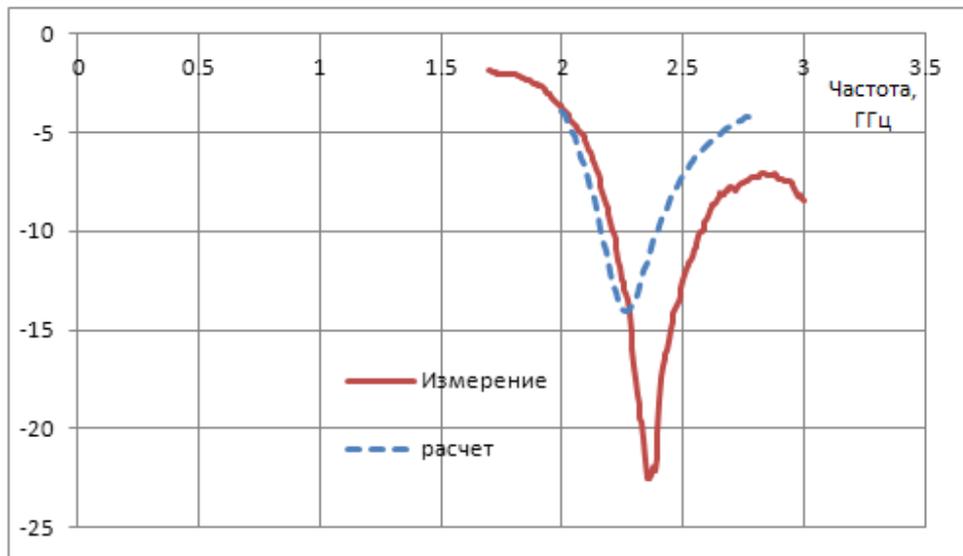


Рис.17. Характеристика согласования для антенны из медной фольги на пленке полиимида (на рис.14)

Возможные причины расхождения расчетных и экспериментальных данных:

- некоторое отличие реальных параметров подложек (толщина, диэлектрическая проницаемость) от величин, заданных в модели;

- небольшой изгиб пленки полиимида для антенн, изготовленных на ней;
- недостаточно точные данные относительно проводимости чернил в печатной антенне;
- отсутствие электрических характеристик используемых клеевых слоев в исследуемом диапазоне частот;
- влияние разъемов на согласование;
- влияние отрезка возбуждающего кабеля, примыкающего к разъему и к антенне.

Надо отметить, что на данном этапе исследования у авторов не было возможности провести измерения диаграммы направленности и радиационных характеристик антенн и сравнить их с расчетными данными. Однако можем предполагать, что характеристики излучения печатных антенн достаточно точно определяются по результатам моделирования, представленным выше. Об этом также свидетельствуют и результаты сопоставления измеренных и расчетных характеристик излучения в других опубликованных исследованиях в этой области, обзор которых приведен во Введении.

4. Выводы

В данной работе изложены результаты исследования печатных антенн из проводящих серебряных чернил с точки зрения возможности создания на их основе эффективных излучателей в СВЧ диапазоне. Эти результаты показывают, что антенны из чернил на пленках полиимида имеют достаточно малые омические потери и высокую радиационную эффективность, сравнимую с эффективностью обычной антенны с проводниками из меди. Антенны из чернил на бумаге на данном этапе показали недостаточную эффективность. Предполагается, что эффективность таких антенн можно значительно повысить при использовании более качественных бумажных подложек, типа Arjowiggins Creative Papers (PowerCoat Paper, см.[6]) при сохранении малой стоимости.

Основной областью использования на практике эффективных и дешевых излучателей на чернилах могут стать антенны тэгов (меток) в различных системах RFID. В настоящее время для их изготовления используются медные проводники, что увеличивает стоимость тэгов и всей системы. При замене традиционной технологии медных проводников на инновационную технологию печати проводящими чернилами на бумажных подложках RFID системы могут получить широкое и повсеместное распространение.

Авторы благодарят сотрудников компании ЗАО «Акметрон» Артема Рябокуля и Антона Кроля за возможность использования измерительного оборудования компании и помощь в проведении измерений.

Литература

1. G. Shaker, S. Safavi-Naeini, N. Sangary, and M. M. Tentzeris. Inkjet Printing of Ultrawideband (UWB) Antennas on Paper-Based Substrates. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 10, 2011, p.111-114.
2. K. Kirschenmann, K. W. Whites, and S. M. Woessner. Inkjet Printed Microwave Frequency Multilayer Antennas. // Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, 2007, p. 924-927.
3. I. Kharrat, G. Eymin Petot Tourtollet, J.-M. Duchamp, Ph. Benech, P. Xavier, and T-P. Vuong. Design and Realization of Printed on Paper Antennas. // Proceedings of 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2013, p. 3199-3202.
4. G. A. Casula, G. Montisci, and G. Mazzarella. A Wideband PET Inkjet-Printed Antenna for UHF RFID. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 12, 2013, p.1400-1403.
5. P. Pongpaibool. A Study of Cost-Effective Conductive Ink for Inkjet-Printed RFID Application. // Proceedings of ISAP2012, Nagoya, Japan, POS2-55, p.1248-1251.
6. Energizing paper. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.powercoatpaper.com>