

УДК 621.396:534

РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЕТКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В ДИАПАЗОНЕ 2.4-2.483 ГГц ДЛЯ АНТИКОЛЛИЗИОННЫХ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ

С. Г. Сучков¹, С. А. Никитов^{1,2}, С. С. Янкин¹, А. А. Пиловец¹, С. В. Комков¹,
В. А. Николаевцев¹, Ю. А. Шатрова¹

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83

² Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 16 октября 2017 г.

Аннотация. Теоретически и экспериментально исследованы характеристики антиколлизийной системы радиочастотной идентификации (РЧИ) в диапазоне частот 2.4-2.483 ГГц (ISM диапазоне) с использованием радиочастотных идентификационных меток (РИМ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с дискретно-временным кодированием.

Представлены результаты расчета и экспериментальных исследований характеристик РИМ и ее приемо-передающей антенны.

Показана возможность реализации антиколлизийной системы РЧИ с РИМ на ПАВ, позволяющей одновременно идентифицировать до 100 близко расположенных объектов, при использовании дискретно-временного кодирования с моноимпульсным режимом опроса. Максимальная дальность идентификации объектов в данной системе составляет 20 м.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация, поверхностные акустические волны, проблема коллизии, электронная литография, дискретно-временное кодирование.

Abstract. This article is dedicated to the problem of anti-collision protection of system of radio frequency identification (RFID) of objects. Such system is based on

RFID tags on surface acoustic waves (SAW) and operating in the microwave band. Method of discrete-time coding is realized in this system.

The optimal design of the RFID tags for such system is found in this paper. Calculation of the topology of the metalized structure was carried out by the finite element method. The finite thickness of the electrodes, the SAW energy scattering into the volume and the difference in the material constants between the film structures and the bulk material were taken into account. The geometric parameters of the interdigital transducer fingers and the reflective structure pins and the sizes of the code position are given.

The simulation results and experimental responses of the RFID tag and its transceiver antenna are presented. Frequency S_{11} and time-domain $S(t)$ responses of anti-collision RFID tags are shown. The frequency response S_{11} of the antenna and its impedance are shown in the form of Smith chart.

The responses of the anti-collision RFID system based on SAW tags with discrete-time coding in the ISM frequency band (2.4 - 2.483 GHz) were studied theoretically and experimentally. The time-domain simultaneous response $S(t)$ of the seven anti-collision RFID tags is presented.

The possibility of creation of an anti-collision RFID system based on SAW tags which allows us to identify simultaneously up to 100 closely located objects is shown. Such possibility occurs if one uses the discrete-time coding with a single-pulse interrogation mode. The maximal distance of identification of the objects in such system is 20 m.

Key words: radiofrequency identification, surface acoustic wave, collision problem, electron lithography, discrete-time encoding.

1. Введение

Интенсивный рост крупных логистических, транспортных и конвейерных систем во всем мире требует непрерывного совершенствования используемых в них систем автоматической регистрации и идентификации подвижных и неподвижных объектов [1-5]. Поэтому широкое распространение получили

системы радиочастотной идентификации (РЧИ), работающие в различных разрешенных диапазонах частот. В СВЧ-диапазоне используются пассивные радиочастотные идентификационные метки (РИМ), изготовленные как по технологии интегральных схем (ИС) [6], так и по технологии устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [7, 8]. РИМ на ПАВ, в отличие от РИМ на ИС, обеспечивают сохранность кода при электромагнитных и радиационных воздействиях. Системы РЧИ, кроме набора РИМ с различными кодами, включают приёмо-передающее считывающее устройство, называемое ридером, программное обеспечение с различными интерфейсами, обеспечивающими проводную или беспроводную связь ридера с компьютером, на котором размещена база данных с информацией о свойствах кодированных объектов. Данная работа посвящена исследованиям, позволяющим обеспечить антиколлизийную защиту систем РЧИ с РИМ на ПАВ.

В системах РЧИ, использующих РИМ на ПАВ, в основном применяется конструкция в виде отражательной линии задержки, содержащей один встречно-штыревой преобразователь (ВШП) ПАВ, соединенный с антенной, и систему отражателей в виде металлических полосок или канавок на поверхности кристалла [9]. Возможна также конструкция РИМ в виде согласованного фильтра фазо-кодо-манипулированного сигнала [7, 10], состоящего из двух ВШП, один из которых секционированный.

Системы радиочастотной идентификации с РИМ на ПАВ применяются в настоящее время в двух разрешенных диапазонах частот 860-960 МГц и 2400-2483 МГц (ISM-диапазон) [2, 7]. Разработаны также РИМ в новом разрешенном диапазоне частот 5650-6425 МГц [11]. Преимуществом систем радиочастотной идентификации, работающих в более высокочастотном диапазоне, является уменьшение размеров РИМ за счет уменьшения размеров антенны [12, 13], при сохранении дальности идентификации 10-15 м, а также устранение влияния промышленных и бытовых помех в диапазоне частот 5825-6425 МГц, не пересекающимся с диапазоном частот систем Wi-Fi.

2. Постановка задачи

Масштабному внедрению систем радиочастотной идентификации препятствует проблема так называемой коллизии кодовых сигналов, возникающая при одновременном нахождении в области излучения ридера нескольких объектов, помеченных РИМ [14-17]. При одновременном приеме сигнала опроса несколькими РИМ, расположенными в области излучения ридера, они излучают в ответ одновременно несколько кодовых последовательностей импульсов. При этом на входе ридера происходит перемешивание сигналов, что препятствует идентификации каждой РИМ в отдельности.

Целью данной работы является разработка СВЧ РИМ на ПАВ для построения антиколлизийной системы радиочастотной идентификации, основанной на дискретно-временном способе кодирования [18, 19]. Этот метод основан на применении меток в виде отражательных линий задержки на ПАВ с одним отражателем, расположенном на различных расстояниях от ВШП. В этом случае кодирование происходит одним импульсом по его уникальному времени задержки и называется моноимпульсным кодированием. Общее число кодов в такой системе подчиняется теореме Шеннона [20], в соответствии с которой максимальная информация I , которую можно передать в информационном канале:

$$I = B \times T (\text{бит}), \quad (1)$$

где B - полоса частот канала, T - длительность информационного сигнала. Для получения информации об одновременном присутствии каких-то РИМ среди возможных N меток требуется при моноимпульсном кодировании N бит. Тогда длительность сигнала T определяет длину кодовой зоны для N кодовых позиций в виде:

$$L_k = \frac{1}{2} V_s T = \frac{V_s N}{2B}, \quad (2)$$

где V_s - скорость ПАВ, а длина одной кодовой позиции

$$l_k = \frac{V_s}{2B}. \quad (3)$$

В ISM диапазоне при использовании всей полосы частот $B = 83$ МГц минимальная длительность кодового импульса $\tau = 1/B \approx 12$ нс, поэтому длина кодовой позиции рефлекторов (минимальная) $l_k = 24$ мкм для наиболее применяемого в широкополосных устройствах на ПАВ $Y + 128^\circ$ -среза кристалла ниобата лития, где скорость ПАВ по оси X $V_s = 3983.2$ м/с. Тогда, например, для $N = 100$ длина кодовой зоны (минимальная) $L_k = 2.4$ мм. Такие размеры кодовой зоны позволяют обеспечить миниатюрные размеры кристаллического чипа (3×3 мм²) РИМ с одновременной идентификацией до 100 меток.

Дальность идентификации меток во многом определяется внутренними потерями сигнала в метке, которые складываются из двукратных потерь на преобразование сигнала в ВШП, потерь сигнала при отражении от отражателя и потерь на распространение ПАВ. Поэтому при конструировании РИМ необходимо по возможности максимально снизить эти потери. Дополнительного снижения потерь (до 6 дБ) сигнала в таких метках можно достичь за счет использования однонаправленного ВШП [21] или использования двух отражателей, расположенных симметрично по разные стороны от двунаправленного ВШП [22].

Задачей данной работы является расчет, проектирование и создание конструкции РИМ на ПАВ в диапазоне частот 2.4-2.483 ГГц, реализующей принцип дискретно-временного кодирования и обеспечивающей одновременное распознавание 100 меток на расстоянии до 20 м, что превышает возможности, достигнутые ранее в системе радиочастотной идентификации на МКС [23], где одновременно распознавались до 36 меток.

3. Расчет и экспериментальное исследование отражательной линии задержки ПАВ

Расчет топологии и электрических характеристик РИМ на ПАВ был выполнен с помощью программного комплекса “COMSOL Multiphysics”,

позволяющего с высокой точностью решать задачи о поверхностных акустических волнах при наличии на поверхности кристалла топографических неоднородностей [24-27].

Рассматриваемая структура антиколлизонной РИМ с двусторонним расположением рефлекторов схематически изображена на рис. 1. На поверхности кристаллической подложки из ниобата лития ($LiNbO_3$) $Y + 128^\circ$ -среза расположен ВШП, состоящий из $m = 23$ алюминиевых электродов с шириной $b = \lambda/4$, зазором $g = \lambda/4$, где $\lambda = 1.50$ мкм – средняя длина ПАВ под решеткой электродов на центральной частоте рассматриваемого диапазона ($f_0 = 2450$ МГц). Данная конструкция позволяет эффективно возбуждать и принимать ПАВ в рассматриваемом диапазоне частот с низким уровнем искажений сигнала. Два рефлектора, содержащих по 5 полосковых отражателей кодовых импульсов с шириной полосы $b = \lambda/4$, размещены симметрично по разные стороны от ВШП на одинаковом расстоянии от него. Начальная задержка кодовых импульсов, устраняющая влияние паразитных отражений электромагнитных радиоимпульсов опроса (РИО) от окружающих предметов на расстоянии до 150 м от антенны ридера, составляет $\tau_0 = 1$ мкс, что обеспечивается минимальным расстоянием от ВШП до первого рефлектора $L = 2$ мм.

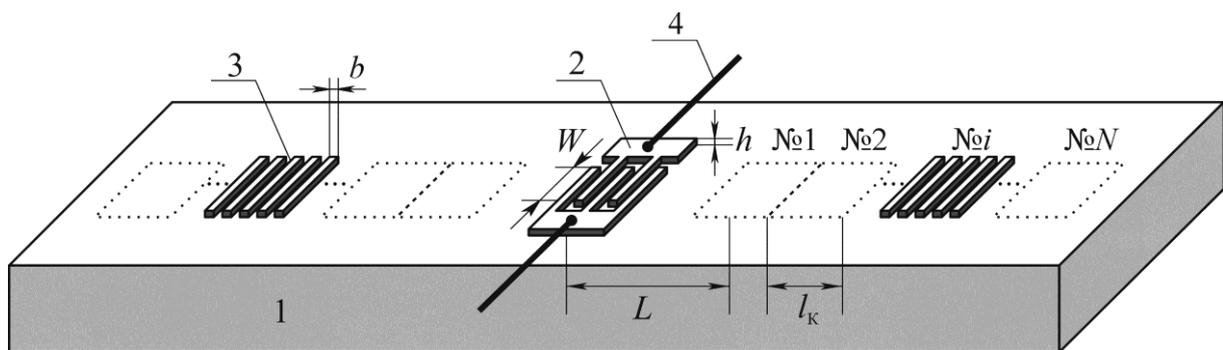


Рис. 1. Общий вид электродной структуры РИМ на ПАВ двусторонней конфигурации:

1 – кристаллическая подложка, 2 – электроды ВШП, 3 – группы отражателей, 4 - антенна. Возможные кодовые позиции обозначены № 1-№ N.

Оптимальная толщина электродов ВШП и отражающих полосковых элементов выбирается такой, чтобы при небольшом рассеянии энергии ПАВ в объём кристалла сопротивление электродов не было слишком большим. Таким образом, толщина составила $h = 90$ нм. Акустическая апертура ВШП составляет $W = 160$ мкм (107λ) и обеспечивает согласование ВШП по активной составляющей импеданса, равной 50 Ом. При расчетах учитывалась конечная толщина электродов, использовались акустические параметры плёночных структур из алюминия с примесью меди (4%) [28], а также рассчитывалось и учитывалось рассеяние энергии ПАВ в объём по методу [29]. Согласование ВШП по реактивной составляющей импеданса обеспечивается конструкцией антенны, подключаемой к контактными площадкам ВШП.

При дискретно-временном кодировании начальный код задается двойным временем прохождения ПАВ расстояния L между ВШП и рефлектором [8, 17, 18]. Каждый следующий код получается смещением рефлектора на одну кодовую позицию, для рассматриваемого диапазона выбранную равной $l_k = 25$ мкм (рис. 1).

Для топологии РИМ, изображённой на рис. 1, по модели [24] рассчитывалась частотная зависимость элемента матрицы рассеяния $S_{11}(f)$ ВШП, а затем вычислялся временной отклик РИМ $S(t)$ с помощью обратного Фурье-преобразования от произведения функции $S_{11}(f)$ и спектра S_{pulse} радиоимпульса опроса:

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{11}(f) * S_{pulse} * e^{j2\pi ft} df \quad (4)$$

Данный радиоимпульс имел длительность $\Delta t = 12$ нс, частоту заполнения $f_0 = 2450$ МГц и огибающую в виде функции Гаусса (рис.4б).

Расчетные потери информационного сигнала в метке для первой кодовой позиции составляют около 30 дБ, для 50-й – 41 дБ, для 100-й – 52 дБ. Важным для дискретно-временного кодирования является отсутствие необходимости в выравнивании амплитуд всех кодовых импульсов, как это требуется при

многоимпульсном коде. Это значительно увеличивает расстояние идентификации.

Экспериментальные образцы РИМ имели электродную структуру ВШП и отражателей, размеры которых указаны выше. Металлизированные структуры РИМ были изготовлены по технологии “lift-off” [30, 31] из алюминия с примесью меди (4%). Экспонирование топологической структуры с минимальным размером 375 нм осуществлялось на установке электронно-лучевой литографии высокого разрешения CABL-9000С.

На рис. 2а представлено изображение ВШП и контактных площадок изготовленной металлизированной структуры метки с помощью лазерного 3D микроскопа Olympus LEXT OLS4100. На рис. 2б приведена электронография структуры ВШП изготовленного образца. Электроды ВШП имеют ширину в пределах 375-380 нм и толщину 90 ± 1 нм. Видно, что дефекты типа разрывов или «закороток» электродов отсутствуют.

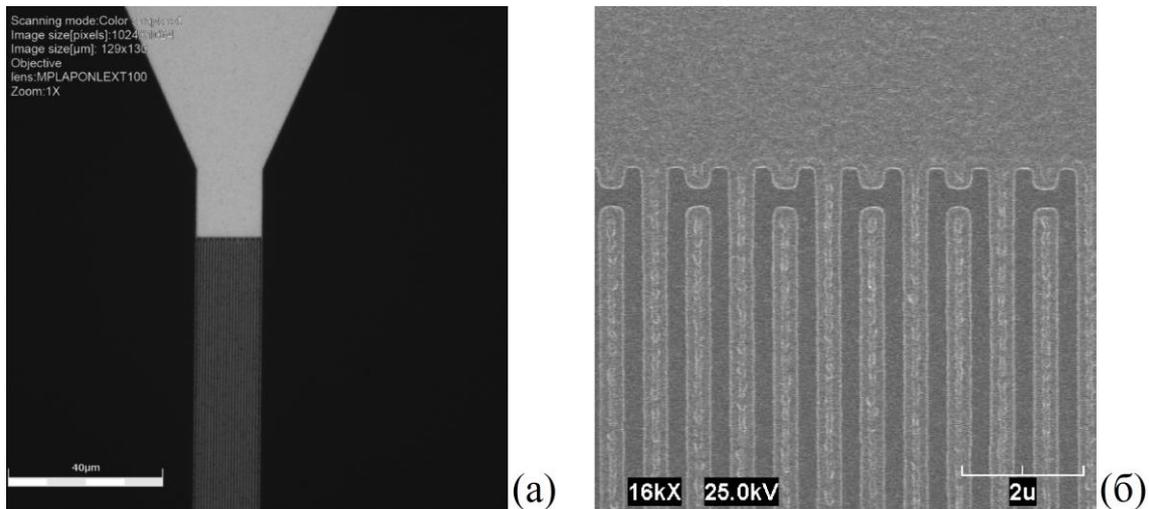


Рис. 2. Изображение ВШП изготовленной РИМ, полученное: (а) на микроскопе Olympus LEXT; (б) на электронном литографе CABL-9000С в режиме электронного микроскопа.

Измерение частотных характеристик $S_{11}(f)$ изготовленных образцов РИМ производилось с помощью векторного анализатора цепей Agilent Technologies PNA-L N5230С и зондовой станции MPI TS150. Результаты измерений представлены на рис. 3.

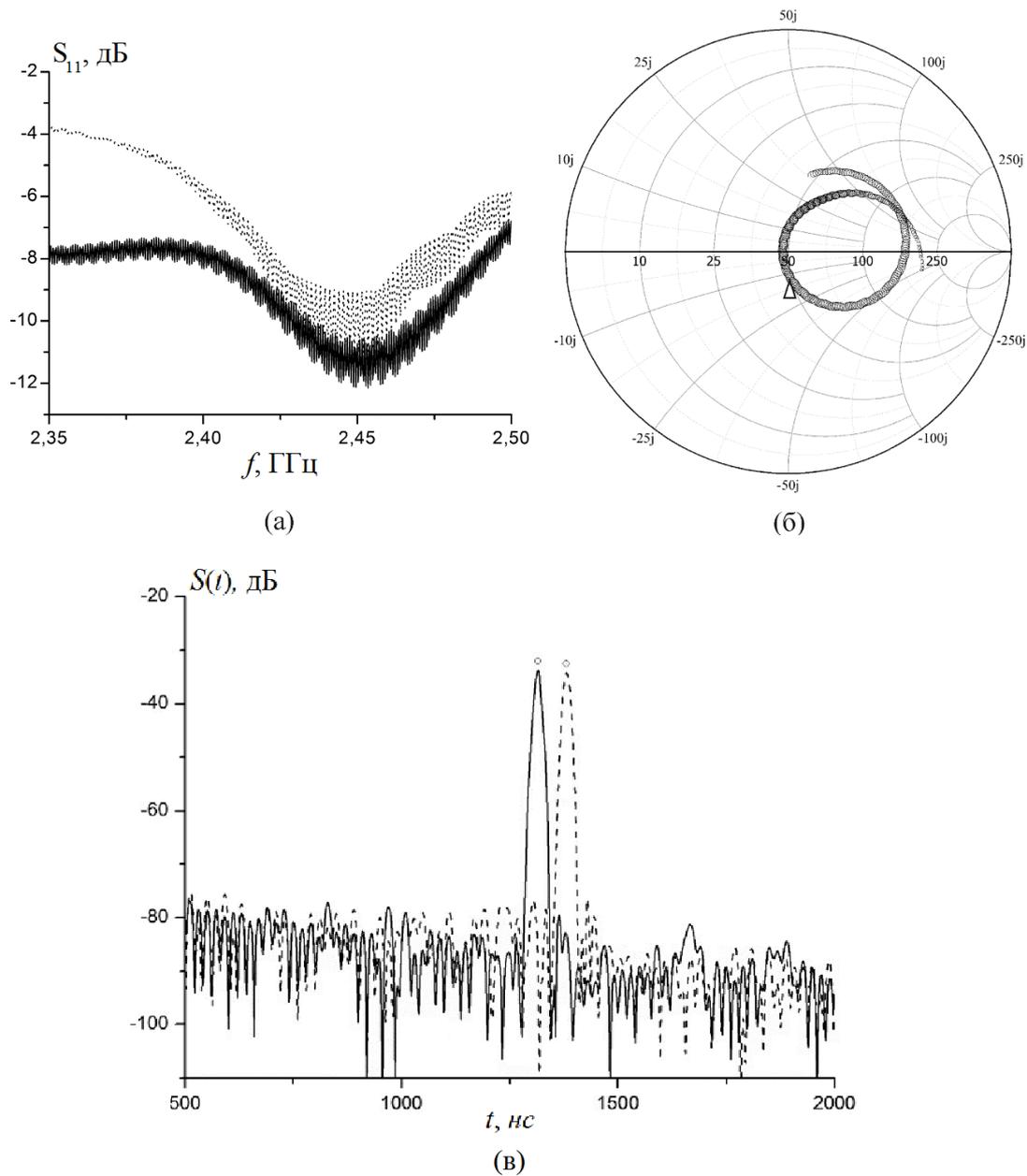


Рис. 3. Характеристики изготовленной РИМ: (а) амплитудно-частотная характеристика $S_{11}(f)$ (пунктиром отмечена расчетная кривая); (б) частотная характеристика импеданса (диаграмма Смита) (центральная частота рассматриваемого диапазона $f_0 = 2.45$ ГГц отмечена треугольным маркером); (в) экспериментальные временные характеристики $S(t)$ кодовых сигналов антиколлизийных РИМ с кодами № 5 (сплошная линия) и № 11 (штриховая линия).

Минимум характеристики S_{11} (рис. 3а) соответствует максимуму амплитудно-частотной характеристики ВШП. Группы осцилляций соответствуют интерференции входного сигнала с сигналом, отраженным от

кодowego рефлектора. Превышение потерь сигнала, измеренных при проведении эксперимента, над расчётными связано с потерями в зондовом устройстве. Диаграмма Смита (рис. 3б) показывает, что изготовленная метка имеет ёмкостный импеданс $X_C = -17j$ Ом на центральной частоте диапазона (показана треугольной меткой). Эта величина является исходной для проектирования антенны с соответствующей индуктивностью.

По измеренным частотным характеристикам $S_{11}(f)$ пересчетом по формуле (4) определены временные характеристики изготовленных РИМ, которые приведены на рис. 3в. Для сравнения расчетных и экспериментальных данных на рисунке кружками отмечены расчётные значения максимумов отраженных импульсов.

РИМ с рефлектором, расположенным в кодовой позиции № 5 (рис. 3 - сплошная линия), имеет время задержки $\Delta t = 1.314$ мкс, что с высокой точностью соответствует расчетной задержке для указанной кодовой позиции. Потери информационного сигнала составили 33,4 дБ. Штриховой линией приведен отклик другой метки с рефлектором в позиции № 11. Время задержки для данной РИМ составляет $\Delta t = 1.380$ мкс, ослабление - 34,0 дБ, что также хорошо соответствует результатам расчетов. Полученные в эксперименте потери информационного сигнала на 1.5-2 дБ превышают расчетные данные, что может быть объяснено омическими потерями в ВШП [21] и превышением реальных потерь на распространение ПАВ над справочными [2].

4. Проектирование антенны РИМ

Антенна метки на ПАВ нагружена на ВШП, импеданс которого имеет ёмкостный характер (рис. 3б). Поэтому для согласования ВШП с антенной необходимо спроектировать антенну с сопряженным импедансом, имеющим индуктивный характер.

При проектировании такой антенны за основу взяты гибридные рамочные антенны, описанные в работе [32]. Такие антенны имеют достаточно широкую рабочую полосу частот и обладают хорошей эффективностью приема/передачи

энергии. Антенны спроектированы и изготовлены на подложке из стеклотекстолита FR-4 толщиной 0,6 мм, имеющей диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 4.3$ и тангенс потерь $tg \delta = 0.02$ в используемом диапазоне частот. Топология антенны была скорректирована таким образом, чтобы её индуктивность компенсировала ёмкость ВШП. Частотная характеристика $S_{11}(f)$ разработанной антенны и диаграмма Смита приведены на рис. 4.

Изготовленные образцы антенн (рис. 5) имели центральную частоту 2.45 ГГц, рабочую полосу около 90 МГц, а также индуктивность на центральной частоте равную 840.2 нГн, которая позволяет согласовать антенну с ВШП линии задержки на ПАВ (рис. 5б).

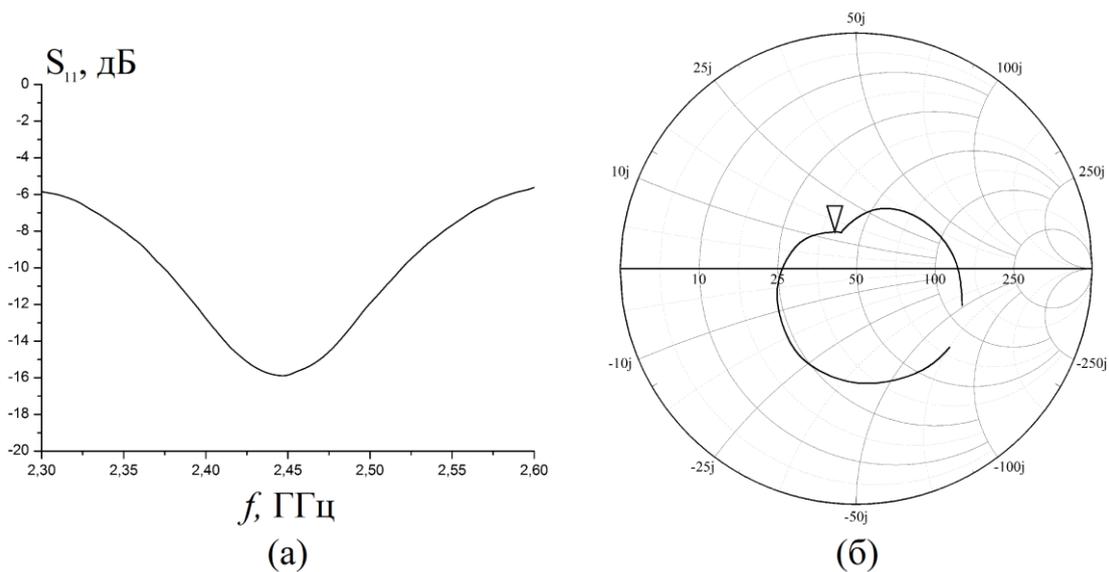
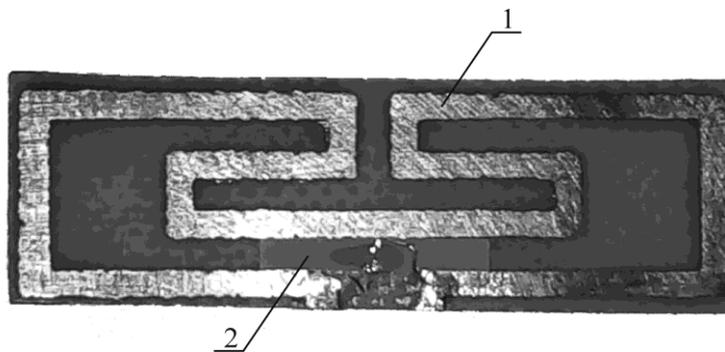


Рис. 4. Частотная характеристика S_{11} антенны: (а) амплитудная, (б) диаграмма Смита (центральная частота рассматриваемого диапазона $f_0 = 2.45$ ГГц отмечена треугольным маркером).



1 – антенна, 2 – линия задержки на ПАВ.

Рис. 5. Фотография разработанной РИМ с кристаллическим чипом и антенной.

5. Экспериментальное исследование антиколлизийных свойств РИМ

Антиколлизийные свойства исследовались для массива из семи РИМ с близкими (для проверки разрешающей способности) кодами № 5, 9, 11, 17, 21, 32 и 38.

В качестве ридера использовалась установка из анализатора цепей и антенной системы. Антенная система состояла из двух направленных Wi-Fi-антенн, одна из которых подключалась к генераторному выходу анализатора цепей, а другая ко входу приёмника анализатора цепей. Антенны имели одинаковые габаритные размеры $10 \times 10 \text{ см}^2$ и коэффициент направленности $K_n = 14 \text{ дБи}$.

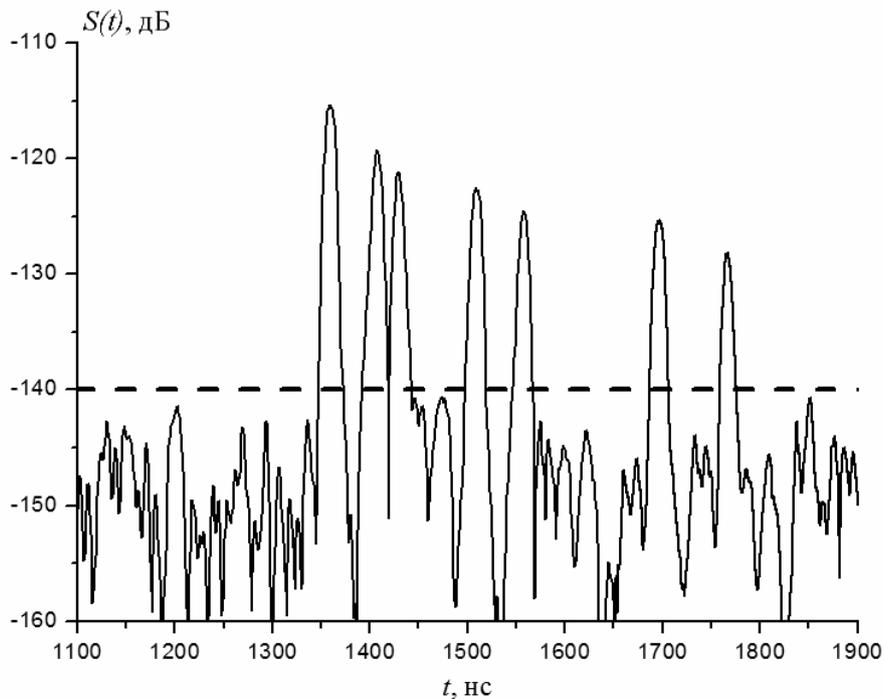


Рис. 6. Временная амплитудная характеристика $S(t)$ одновременного отклика семи антиколлизийных РИМ (с кодами № 5, 9, 11, 17, 21, 32 и 38). Штриховой линией обозначена чувствительность ридера.

Массив из семи РИМ располагался на расстоянии около 6 м от приемной антенны. Временная характеристика одновременного ответа на радиоимпульс опроса всех семи РИМ представлена на рис. 6. Видно, что все семь кодовых импульсов однозначно идентифицируются, что указывает на возможность практической реализации такой антиколлизийной системы. Из

экспериментальных результатов следует, что при использовании массива из 100 РИМ потери 100-го информационного сигнала составляют около 137 дБ. Как уже отмечалось, в системе РЧИ с моноимпульсным кодированием не требуется выравнивания амплитуд кодовых импульсов, поэтому такие потери вполне допустимы для распознавания кодового импульса при практической реализации, например, при использовании приемника с чувствительностью -140 дБм.

Максимальное количество антиколлизийных кодов РИМ с дискретно-временным кодированием определяется как чувствительностью приёмника, так и дифракционными потерями электромагнитного сигнала в системе антенн ридера и РИМ. Последними можно управлять, изменяя площадь антенн ридера и их коэффициент направленности.

Расстояние идентификации зависит также от мощности генератора. Так, в описанном эксперименте анализатор цепей имеет мощность генератора 2 мВт, что создает поток мощности вблизи антенны 0.02 мВт/см^2 . По нормам СанПиН [33] для человека допустим поток мощности 1 мВт/см^2 . Поэтому при увеличении потока мощности до допустимого уровня в исследованной системе дальность идентификации возрастет до 20 м.

6. Заключение

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была показана практическая возможность реализации антиколлизийной системы РЧИ с РИМ на ПАВ, использующими дискретно-временное кодирование с моноимпульсным режимом опроса. Показано, что в ISM диапазоне реально осуществить одновременное распознавание до 100 близко расположенных объектов при дальности идентификации до 20 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 16-32-00120 мол_а.

Литература

1. Turcu C. Development and Implementation of RFID Technology. Vienna: I-Tech, 2009.
2. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters. L.: Academic Press, 2007.
3. Cazeca M.J., Mead J., Chen J., Nagarajan R. Passive wireless displacement sensor based on RFID technology. // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 190. P. 197.
4. Volk T., Gorbey S., Grünwald W., Bhattacharyya M., Reindl L., Lemmer B., Jansen D. Semi-passive powered biotelemetry for small animals. // Sensors and Actuators A: Physical. 2015. V. 221. P. 95.
5. Salmerón J.F., Rivadeneyra A., Agudo-Acemel M., Capitán-Vallvey L.F., Banqueri J., Carvajal M.A., Palma A.J. Printed single-chip UHF passive radio frequency identification tags with sensing capability. // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. V. 220. P. 281.
6. Finkenzeller K. RFID Handbook. New York: John Wiley and Sons, 2003.
7. Plessky V., Reindl L. Review on SAW RFID tags. // IEEE Trans. 2010. V. UFFC-57 №. 3. P. 654.
8. Scholl G., Schmidt F., Ostertag T., Reindl L., Scherr H., Wolff U. Wireless passive SAW sensor systems for industrial and domestic applications. // Proc. 1998 IEEE Frequency Control Symp., Los Angeles, USA 27-29 May 1998. N.Y.: IEEE, 1998. P. 595.
9. Harma S., Arthur W., Hartmann C., Maev R.G., Plessky V.P. Inline SAW RFID tag using time position and phase encoding. // IEEE Trans., 2008.V. UFFC-55, №. 8. P. 1840.
10. Дмитриев В.Ф., Койгеров А.С. Исследование радиоидентификаторов на поверхностных акустических волнах с заданными корреляционными свойствами. // РЭ, 2011. Т. 56. № 10, С. 1268.
11. Plessky V., Lamothe M., Davis Z., Suchkov S. SAW tags for the 6-GHz range. // IEEE Trans. 2014. V. UFFC-61. № 12. P. 2149.

12. Suchkov S.G., Yankin S.S., Nikolaevtsev V.A., Suchkov D.S., Shatrova I.A., Ermishin V.V., Nikitov S.A.. Radiofrequency identification system based on surface acoustic waves for novel frequency range 6 GHz. // Proc. 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Saratov, Russian Federation, 25-26 Sept. 2014. Saratov: SSTU. P. 307.
13. Сучков С.Г., Николаевцев В.А., Сучков Д.С., Ермишин В.В., Россошанский А.В. Анализ методом конечных элементов интегральной антенны радиочастотной идентификационной метки в диапазоне частот 5,5-6,5 ГГц. // Известия Саратовского университета. Новая Серия. Серия Физика. 2014. Т. 14. № 2. С. 12.
14. Malocha D., Gallagher M., Fisher B., Humphries J, Gallagher D, Kozlovski N. A Passive Wireless Multi-Sensor SAW Technology Device and System Perspectives. // Sensors. 2013. V. 13, P. 5897.
15. Stelzer A., Pichler M., Scheiblhofer S., Schuster S. Identification of SAW ID-tags using an FSCW interrogation unit and model-based evaluation. // IEEE Trans., 2004. V. UFFC-51, №. 11. P. 1412.
16. Reindl L., Scholl G., Ostertag T., Scherr Y., Wolff U., Schmidt F. Theory and application of passive SAW radio transponders as sensors. // IEEE Trans. 1998. V. UFFC-45. № 5. P. 1281.
17. Hartmann C., Hartmann P., Brown P., Bellamy J., Claiborne L., Bonner W. Anti-collision methods for global SAW RFID tag systems. // Proc. 2004 IEEE Int. Ultrasonics Symp. Montreal 23-27 Aug. 2004. N.Y.: IEEE, 2004. P. 805.
18. Stierlin R., Küng R. Process for carrying out a non-contact remote enquiry. Патент США на изобретение №6407695, опубл. 18.06.02.
19. Багдасарян С.А., Багдасарян А.С., Карапетьян Г.Я., Нефедова Н.А. Система радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах. Патент РФ на изобретение № 2344437. // Бюлл. изобр. 2009. № 2.
20. C. Shannon. A Mathematical Theory of Communication. // The Bell System Technical Journal, 1948. V. 27. P. 379.

21. Lehtonen S., Plessky V., Hartmann C., Salomaa M. SPUDT filters for the 2.45 GHz ISM band. // IEEE Trans., 2004. V. UFFC-51, №. 12. P. 1697.
22. Сучков С.Г., Николаевцев В.А., Сучков Д.С., Янкин С.С., Ермишин В.В. Пассивная радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах Патент РФ на полезную модель № 135451. // Бюлл. изобр. 2013. № 34.
23. P. Brown, P. Hartmann, A. Schellhase, A. Powers, T. Brown, C.S. Hartmann, D. Gaines. Asset Tracking on the International Space Station Using Global SAW Tag RFID Technology. // Proc. 2007 IEEE Ultrasonics Symp., New York, 28-31 Oct. 2007. P. 72.
24. Гуляев Ю.В., Сучков С.Г., Янкин С.С., Никитов С.А., Сучков Д.С., Плесский В.П. Радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах в диапазоне частот 6 ГГц. // РЭ. 2015. Т. 60. № 4. С. 429.
25. Borrero G.A., Bravo J.P., Mora S.F., Velásquez S., Segura-Quijano F.E. Design and fabrication of SAW pressure, temperature and impedance sensors using novel multiphysics simulation models. // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 202, P. 204.
26. Graczykowski B. The reflection of Rayleigh surface waves from single steps and grooves. // Journal of Applied Physics. 2012. V. 112, № 10, P. 103520.
27. Darinskii A.N., Weihnacht M., Schmidt H. Surface acoustic wave scattering from steps, grooves, and strips on piezoelectric substrates. // IEEE Trans., 2004. V. UFFC-57, №. 9. P. 2042.
28. Сучков С.Г., Баринов Д.А. Анизотропия упругих свойств тонких металлических пленок и её влияние на характеристики устройств на ПАВ. // РЭ. 2002. Т. 47. № 4. С. 510.
29. Сучков С.Г., Янкин С.С., Никитов С.А., Шатрова Ю.А. Рассеяние поверхностных акустических волн на системе топографических неоднородностей, сравнимых с длиной волны. // РЭ. 2014. Т. 59. № 4. С. 405.

30. Rosenfield M., Thomson M., Coane P., Kwietniak K., Keller J., Klaus D., Volant R., Blair C., Tremaine K., Newman T., Hohn J. Electron-beam lithography for advanced device prototyping: Process tool metrology. // Journal of vacuum science & technology. B. 1993. V. 11, №. 6, P. 2615.
31. Müller A., Konstantinidis G., Buiculescu V, Dinescu A., Stavrinidis A., Stefanescu A., Stavrinidis G., Giangu I., Cismaru A., Modoveanu A. GaN/Si based single SAW resonator temperature sensor operating in the GHz frequency range. // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. V. 209, P. 115.
32. Chen S.-Y., Hsu P. Hybrid Loop Antenna for 2.4-GHz RFID Tags. // Proc. 2005 IEEE International symposium on antennas and propagation, Seoul, Korea, 3-5 Aug. 2005. N.Y.: IEEE, 2005. P. 1045.
33. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Электромагнитные поля в производственных условиях. СанПиН 2.2.4.1191-03 (с изменениями на 2 марта 2009 года).

Ссылка на статью:

С.Г.Сучков, С.А.Никитов, С.С.Янкин, А.А.Пиловец, С.В.Комков, В.А.Николаевцев, Ю.А.Шатрова. Радиочастотные метки на поверхностных акустических волнах в диапазоне 2.4-2.483 ГГц для антиколлизийных систем идентификации. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/14/text.pdf>