

УДК 621.311.16:621.315.05:681.89

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

© 2023 В.О. Кислицын^{1,*}, Б.М. Середин², Г.Я. Каранетьян³, В.Ф. Катаев^{4,**}, Н.В. Ермолаева^{4***}

¹ООО НТЦ «РУСЬ», Санкт-Петербург, 199178, Россия

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428, Россия

³Южный федеральный университет, 344090, Россия

⁴Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ,
Волгодонск, Ростовская обл., 347360, Россия

*e-mail: kislitsyn@rfsaw.ru

**e-mail: kataev.v.f.@gmail.com

***e-mail: ermolnv@mail.ru

Поступила в редакцию: 13.06.2023

После доработки: 15.06.2023

Принята к публикации: 20.06.2023

Проведено экспериментальное исследование применения подложек из ниобата лития для радиочастотных идентификационных 64-битных меток на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в полосе частот 33 МГц на центральной частоте 870 МГц. Метки позволяют легко различать ортогональные коды, поскольку имеют достаточный динамический диапазон и приемлемый уровень шума. Рассмотрены аспекты технологии изготовления и влияния напыления отражателей в метках на основные параметры изделий. Показано, что использование полосков в отражателях вместо ВШП повышает равномерность импульсных откликов, но приводит к росту вносимых потерь. Были исследованы РЧИД метки, в которых толщина напыления алюминиевой пленки, из которой изготавливались ВШП и отражатели, имела разную толщину. Как показали исследования, толщина напыления оказывает значительное влияние на электрические параметры метки. Толщина напыления зависит от числа отражателей в метках и подбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальные вносимые потери и максимальный динамический диапазон. Технология подобрана таким образом, чтобы с высокой вероятностью отклики получались с неравномерностью не более 3 дБ, вносимые потери – в пределах 38–40 дБ.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны (ПАВ), встречно-штыревой преобразователь (ВШП), ниобат лития.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.261

ВВЕДЕНИЕ

Технология радиочастотной идентификации предоставляет возможности автоматической идентификации объектов посредством электромагнитного излучения. Основной задачей системы радиочастотной идентификации является хранение информации об объекте в виде идентификационного кода с возможностью его удобного считывания [1, 4].

Радиочастотные идентификационные (РЧИД) метки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) выгодно отличаются от других пассивных радиометок более высокой скоростью работы, невозможностью их подделки в непромышленных условиях.

Принцип действия РЧИД меток на ПАВ основан на использовании эффекта формирования модулированного сигнала линией задержки на поверхностных акустических волнах при ее возбуждении широкополосным сигналом.

Электромагнитный сигнал, принятый антенной метки с помощью подсоединенного к ней приемопередающего встречно-штыревого преобразователя (ВШП), преобразуется в пакет ПАВ. Этот пакет распространяется по поверхности кристалла до отражателей, которые находятся на различном расстоянии от преобразователя. Отражаясь от них, волновые пакеты приходят на приемопередающий ВШП в различные моменты времени. Преобразователь выполняет обратное преобразование ПАВ в электромаг-

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

нитный сигнал, который излучается антенной, подсоединенной к метке. Варьируя пространственное расположение отражателей, можно изменять временное положение каждого отраженного пакета, образуя различные кодовые последовательности.

Особенности конструирования РЧИД меток на ПАВ

Для уменьшения вносимых потерь в качестве приемо-передающего преобразователя используется однонаправленный ВШП с внутренними отражателями [2], максимальная полоса пропускания которого определяется минимальным числом внутренних отражателей, необходимых для получения однонаправленного режима. Для подложек ниобата лития $YX/128^0$ среза это число равно 13. Так как полоса пропускания ВШП обратно пропорциональна его длине вдоль направления распространения ПАВ, а в однонаправленном ВШП отражатели располагаются через две длины ПАВ на центральной частоте, то полоса его пропускания будет не более $\frac{f_0}{26}$.

В этом случае длина импульсного отклика ВШП равна 30 нс, а полоса частот, занимаемая таким импульсом, равна $\Delta f = 33$ МГц при $f_0 = 870$ МГц. Минимальное расстояние между отражателями выбирается равным $V_{\text{ПАВ}} \cdot \Delta f$, при котором временной интервал между отраженными импульсами будет равен удвоенной длительности импульсного отклика ВШП. Тогда в отраженной от метки кодовой последовательности импульсы не будут перекрываться, что значительно облегчит распознавание кодов.

Апертура приемо-передающего ВШП и всех отражателей была выбрана равной 80 длин ПАВ на частоте акустического синхронизма. В этом случае расходимость ПАВ из-за дифракции можно пренебречь, так как все отражатели находятся в первой зоне Френеля, равной 6400 длин ПАВ на частоте акустического синхронизма. Так как длина приемо-передающего ВШП равна 26 длин ПАВ, то в первой зоне Френеля может поместиться 246 отражателей, что позволяет формировать метки емкостью до 128 бит с учетом защитного интервала.

Чтобы переотраженные от соседних отражателей ПАВ не искажали отраженную импульсную последовательность, отражатели выполняются с малым коэффициентом отражения (не более 0.1–0.15). В этом случае переотраженные

ПАВ по амплитуде будут почти на порядок меньше, чем отраженные ПАВ, падающие на отражатели от приемо-передающего однонаправленного ВШП. Поэтому отражатели, выполненные в виде ВШП, должны содержать малое число электродов, чтобы коэффициент отражения от них не превышал вышеуказанной величины. Необходимо учитывать, что ПАВ, падающие на следующий отражатель, будут по амплитуде несколько меньше, чем ПАВ, падающие на предыдущий отражатель, так как при каждом отражении часть энергии ПАВ уходит в отраженный сигнал, и амплитуда ПАВ по мере распространения в системе отражателей убывает. Следовательно, по мере удаления от приемо-передающего ВШП амплитуды отраженных ПАВ убывают, а импульсы в отраженной последовательности имеют разную (убывающую) амплитуду. Чтобы этого не происходило, коэффициент отражения увеличивается по мере удаления от приемо-передающего ВШП. Это достигается тем, что отражательные ВШП выполнены из двух одинаковых частей, сдвинутых относительно друг друга на расстояние a_i , которое зависит от номера отражателя, отсчитываемого от приемо-передающего ВШП [3, 5].

На рис. 1 показан импульсный отклик и чертеж 32-битной РЧИД метки. Она состоит из однонаправленного приемо-передающего ВШП с внутренними отражателями [2] и восьми групп отражателей. В каждой группе должен находиться один отражатель, который располагается в одном из четырех возможных положений. Каждый отражатель в группе состоит из двух ВШП, содержащих три электрода, расстояние между которыми подобрано таким образом, чтобы коэффициент отражения возрастал по мере удаления от приемо-передающего ВШП [6]. Таким образом, в метке содержатся восемь групп отражателей с различными коэффициентами отражения (по четыре одинаковых отражателя в каждой группе [3]). Расстояние между отражателями в группе равно длине приемо-передающего ВШП. Минимальное расстояние между отражателями в группе $\Delta = 28\lambda = 0.12469$ мм, где $\lambda = 0.00448$ мм (λ – длина ПАВ на центральной частоте f_0). Расстояние между опорным отражателем и ближайшим отражателем равно $3\Delta = 0.3743$ мм. Отсчет ведется от опорного отражателя. Расстояние между группами по четыре отражателя равно 2Δ . Тогда по расстоянию от опорного отражателя можно определить номер группы и положение отражателя в группе.

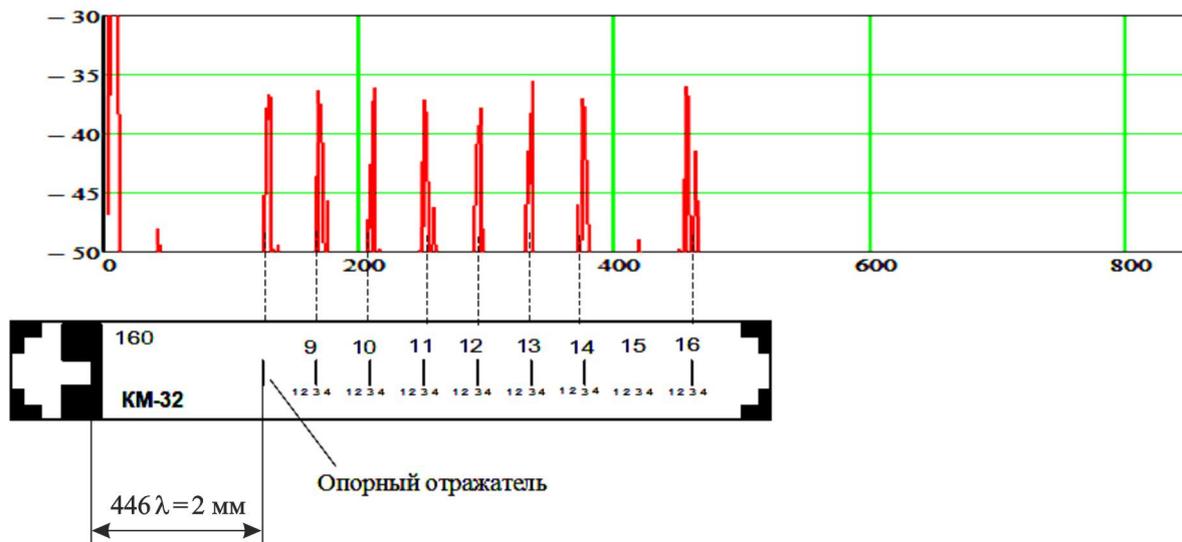


Рис. 1. 32-битная РЧИД метка

Если расстояние от опорного отражателя до отражателя равно $n\Delta$, то расстояние от первого отражателя в первой группе до искомого отражателя равно $\Delta(n - 3)$. Так как расстояние между ближайшими отражателями, находящимися в соседних группах, равна 2Δ , а длина группы – 3Δ , получаем, что отражатель, находящийся на расстоянии $n\Delta$ от опорного отражателя, должен находиться в N -й группе в m -м положении, где N и m определяются из уравнения $n\Delta - 3 = 5N + m$. Для 16 бит метки максимальное $N + 1 = 4$, для 32-бит метки – $N + 1 = 8$, для 64-бит метки – $N + 1 = 16$ и для 128 бит метки – $N + 1 = 32$, $m + 1 = 4$. Отсчет групп ведется от ближайшей к ВШП первой отражательной группе, которая имеет нулевой номер. Нулевой номер имеет также первый в группе отражатель. Например, если $n = 39$, то получаем $39 - 3 = 5N + m$, или $36 = 5N + m$. N подбирается таким образом, чтобы сумма $5N + m$ как можно меньше отличалась бы от $n\Delta - 3$, но была бы меньше $n\Delta - 3$, так, чтобы при увеличении N на 1 сумма $5N + m$ была бы уже больше $n\Delta - 3$. Тогда получаем, что $N = 7$, поскольку $5N = 35$, а при увеличении N на 1 $5N = 40$, что уже больше 36. Поэтому искомым отражатель находится в восьмой группе. Так как $m = 36 - 35 = 1$, то в группе отражатель находится на втором месте. Метки нумеруются трехзначным номером, расположенным слева от отражательного массива. Каждый номер соответствует определенному коду (числу отражателей и положению отражателя в группе). Между опорным отражателем и приемо-передающим ВШП расстояние выбирается равным 446λ , что соответствует длительности примерно равной 0.5 мкс. Это означает, что

ближайший отраженный импульс придет на приемо-передающий ВШП через 1 мкс и его вполне достаточно для отделения паразитных импульсов, отраженных от металлических поверхностей, находящихся в зоне опроса.

При этом кодировка производилась с помощью специального кодирующего фотошаблона, фрагмент которого показан на рис. 2. Как видно, этот фотошаблон состоит из окон, через которые удаляются лишние отражатели. Для совмещения используются реперные знаки. В кодирующем фотошаблоне в каждой из 16 групп содержатся от три или четыре окна, причем в группах, где содержится три окна, положение окон меняется от группы к группе. Таким образом, после кодирования метка содержит не более 16 отражателей (по одному на каждую группу, если в группе три окна, и ни одного, если в группе четыре окна). Каждая закодированная метка нумеруется трехзначным номером, расположенным слева от отражательного массива. Каждый номер соответствует определенному коду (числу отражателей и положению отражателя в группе).

Метки изготавливались на подложках ниобата лития YX/1280 – срезе ниобата лития, групповым методом, на диске ниобата лития диаметром 76 мм. На групповом фотошаблоне, с которого изготавливались метки, содержались все отражатели. Затем с помощью группового кодирующего фотошаблона метки кодировались путем стравливания лишних отражателей. После кодирования на каждой метке оставалось по 16 или менее отражателей, а также номера меток соответствующие кодам.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

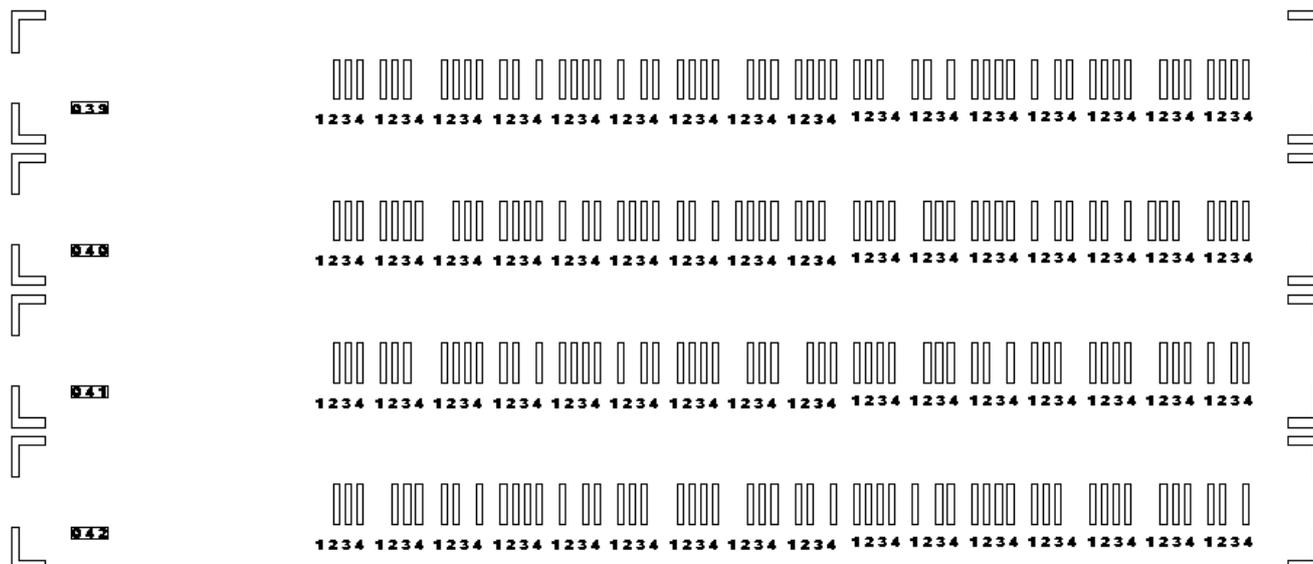


Рис. 2. Фрагмент кодирующего группового фотошаблона

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для измерения электрических параметров РЧИД меток в диапазоне частот на 860–890 МГц на базе анализатора цепей Anritsu MS4623B и зондовой станции PM-5 был изготовлен автоматизированный технологический стенд контроля (рис. 3) с возможностью обработки полученных результатов на ПЭВМ.

Автоматизированный технологический стенд контроля обеспечил выходной контроль ПРАМ как на пластине, так и в SMD-корпусах.

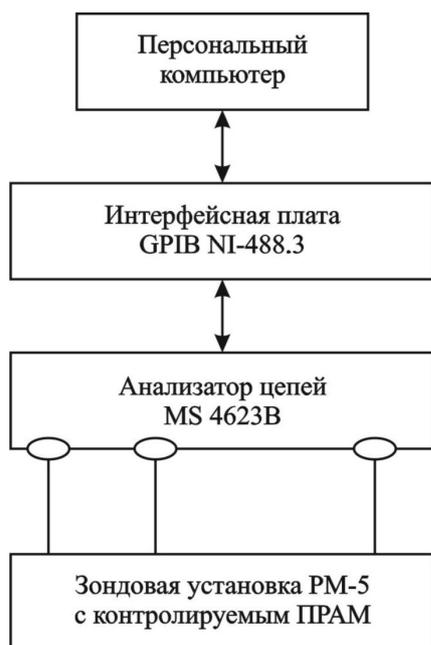


Рис. 3. Структурная схема автоматизированного измерительного стенда

Обмен измерительной информацией при помощи программного обеспечения между анализатором цепей «Anritsu MS4621B» и ПЭВМ в соответствии с интерфейсным протоколом GPIB-448 позволил производить управление и настройку рабочих параметров прибора, необходимые математические расчёты по определению основных параметров ПРАМ, оптимизировать параметры ПРАМ при их разработке.

Для проведения выходного контроля электрических параметров ПРАМ на пластине использовались:

1. Анализатор цепей Anritsu MS 4623B с техническими характеристиками:
диапазон частот – 10 МГц – 6 ГГц;
динамический диапазон – 110 дБ;
разрешение по частоте – 1 Гц;
уровень шума – 105 дБ.
2. Персональный компьютер.
3. Интерфейсная плата GPIB NI – 488.2.
4. Зондовая установка SUSS Micro Tec PM5 с техническими характеристиками:
работа с подложками $\varnothing 76$ мм;
подключение к контактным площадкам 0.3×0.3 мм²;
вакуумный присос подложек;
ручное 3D перемещение и юстировка зондовых головок;
5. зондовые головки IZI PROBE Z-10 N3N-SG-500 с диапазоном рабочих частот до 6.0 ГГц.
5. Кабель соединительный.
6. Измерительный кабель СВЧ (жесткий) до 18 ГГц (50 Ом) TYPE NM.

Для проведения измерений пластину с контролируемым ПРАМ устанавливали на предметный столик зондовой установки РМ5. Зафиксировав положение пластины при помощи винтов перемещения положения предметного столика, устанавливали измерительные зонды над соответствующими шинами ВШП. Винтами подъема предметного столика и винтами перемещения зондов регулировали усилие прижатия зондов к шинам контролируемого ПРАМ.

Использование специальных зондов IZI PROBE Z-10 N3N-SG-500 на установке РМ-5 позволило подавлять сигнал прямого прохождения и измерять частотную зависимость параметра S_{11} приемно-передающего ВШП меток на пластинах (рис. 4) без значительных искажений.

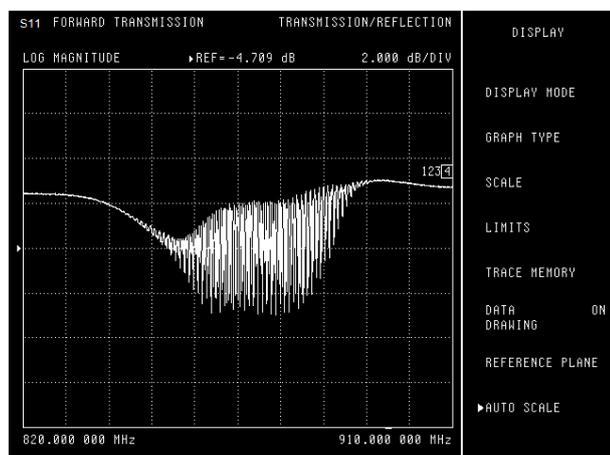


Рис. 4. Частотная зависимость параллельного параметра S_{11} ВШП на пластине

Временные характеристики изготовленных меток были получены Фурье преобразованием амплитудно-частотной характеристики параллельного импеданса ВШП метки с 20 отражателями при помощи программного обеспечения Mathcad 13 с применением встроенной процедуры IFFT(s).

Измерения электрических параметров РЧИД меток в корпусах производились на автоматизированном измерительном стенде (рис. 5).

Для проведения выходного контроля электрических параметров ПРАМ в корпусе SMD использовались:

1. Анализатор цепей Anritsu MS 4623B с техническими характеристиками:
 - диапазон частот – 10 МГц – 6 ГГц;
 - динамический диапазон – 110 дБ;
 - разрешение по частоте – 1 Гц;
 - уровень шума – 105 дБ.
2. Персональный компьютер.
3. Интерфейсная плата GPIB NI – 488.2.

4. Кабель соединительный.
5. Кабель измерительный.
6. Измерительный столик.

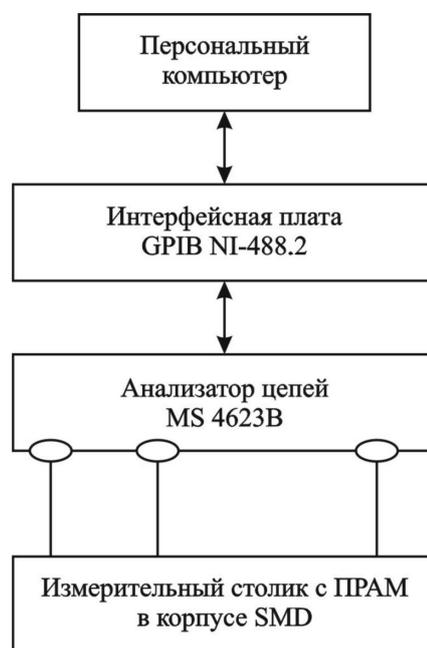


Рис. 5. Структурная схема автоматизированного измерительного стенда для проведения выходного контроля электрических параметров ПРАМ

Проверка электрических параметров ПРАМ в корпусах SMD производилась по следующим параметрам:

- f_0 – центральная частота полосы пропускания ПАВ-устройства;
- неравномерность АЧХ;
- вносимые потери;
- подавление вне полосы пропускания.

Для проведения измерений электрических параметров, ПРАМ, собранные в SMD-корпуса, устанавливались на измерительный столик (рис. 6), представляющий собой измерительную плату, размещенную на дюралюминиевом основании, покрытом сплавом олово-висмут. При изготовлении измерительного столика была учтена конструктивная совместимость с применяемой контрольно-измерительной аппаратурой, на основании измерительного столика закреплены разъемы ВЧ, обеспечивающие подключение к анализатору цепей Anritsu MS 4623B.

Положение корпуса SMD фиксировалось на плате измерительного столика, усилие прижатия контактных площадок корпуса к контактным площадкам измерительной платы регулировалось при помощи специального зажима-струбины.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

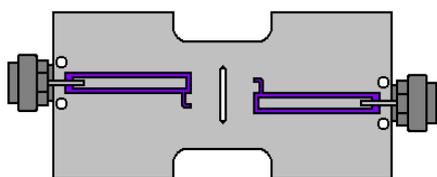


Рис. 6. Плата измерительного столика

Были исследованы РЧИД метки, в которых толщина напыления алюминиевой пленки, из которой изготавливались ВШП и отражатели, имела разную толщину. Как показали исследования, толщина напыления оказывает значительное влияние на электрические параметры метки.

На рис. 7–9 показаны импульсные отклики метки, в которой в каждой группе содержалось по одному отражателю, т.е. в метке было 16 отражателей. Толщина напыления равнялась 1100, 1350 и 550 ангстрем, а отражатели выполнены в

виде ВШП с возрастающим по мере удаления от приемо-передающего ВШП коэффициентом отражения.

Из сравнения этих импульсных откликов видно, что, когда отражатели выполнены в виде ВШП при толщинах 1350 и 1100 ангстрем, импульсные отклики претерпевают значительные искажения из-за внутренних переотражений, и неравномерность становится более 3 дБ. Импульсный отклик становится более или менее равномерным при толщине напыления 550 ангстрем. При этом вносимые потери равны 40 дБ. Но при толщинах напыления 550 ангстрем к шинам ВШП невозможно приварить золотую проволоку. Поэтому необходимо допылять пленку на шины, что усложняет технологию изготовления меток, так как требуется еще один фотошаблон и еще одно напыление.

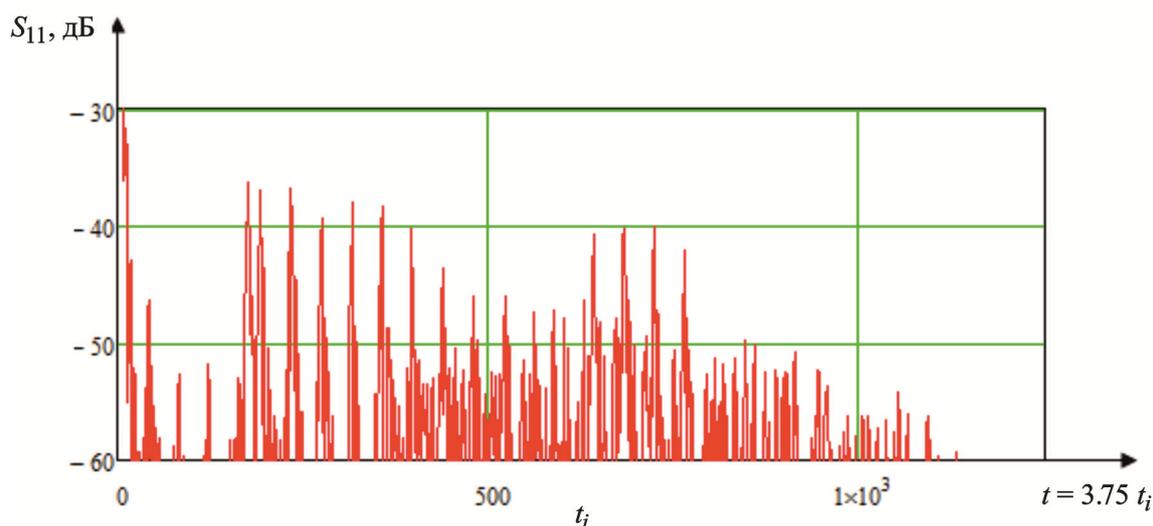


Рис. 7. Метка M94 с отражателями в виде ВШП, толщина напыления 1350 ангстрем

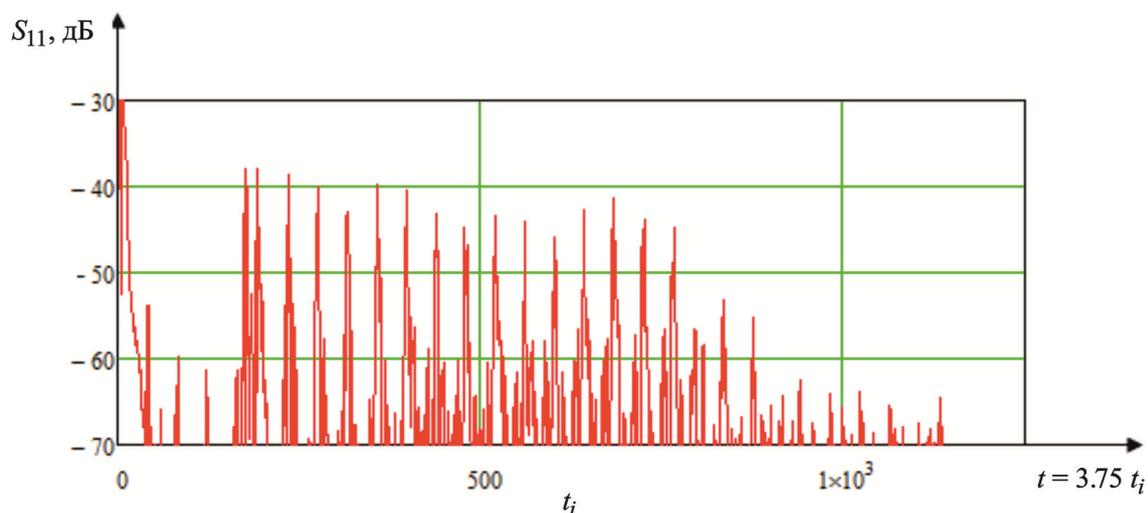


Рис. 8. Метка M94 с отражателями в виде ВШП, толщина напыления 1100 ангстрем

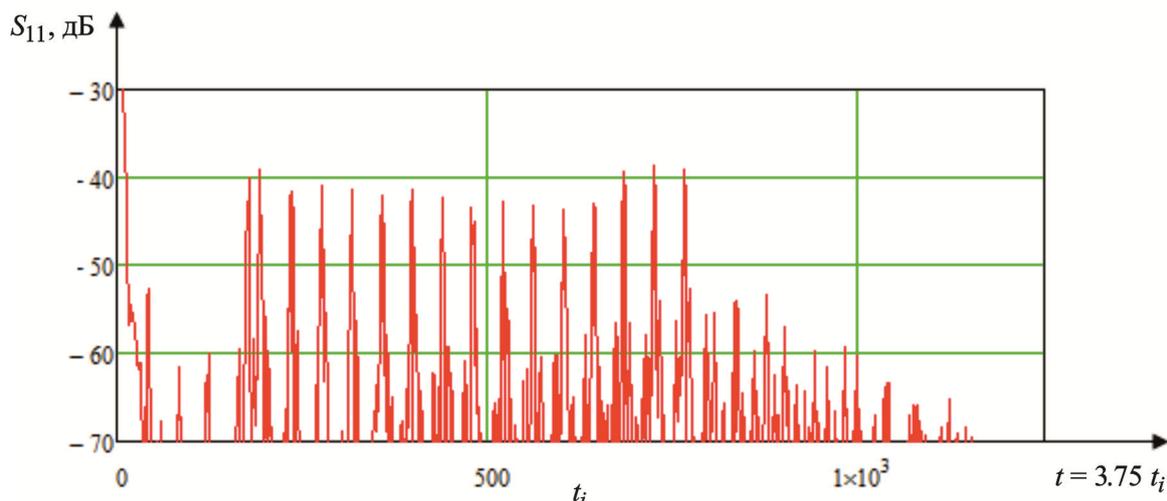


Рис. 9. Метка М94 с отражателями в виде ВШП, толщина напыления 550 ангстрем

При уменьшении числа отражателей импульсные отклики получаются с неравномерностью не более 3 дБ даже при толщинах 1100 и 1350 ангстрем, так как внутренние переотражения в этом случае не сильно искажают импульсный отклик из-за малого числа отражателей.

На рис. 10 и 11 показаны импульсные отклики метки с кодировкой, содержащей 5 отражателей (метка М100). Как видно из сравнения импульсных откликов, при толщине напыления 1100 ангстрем импульсный отклик получается значительно чище, но динамический диапазон метки с толщиной напыления 1350 ангстрем – около 17 дБ.

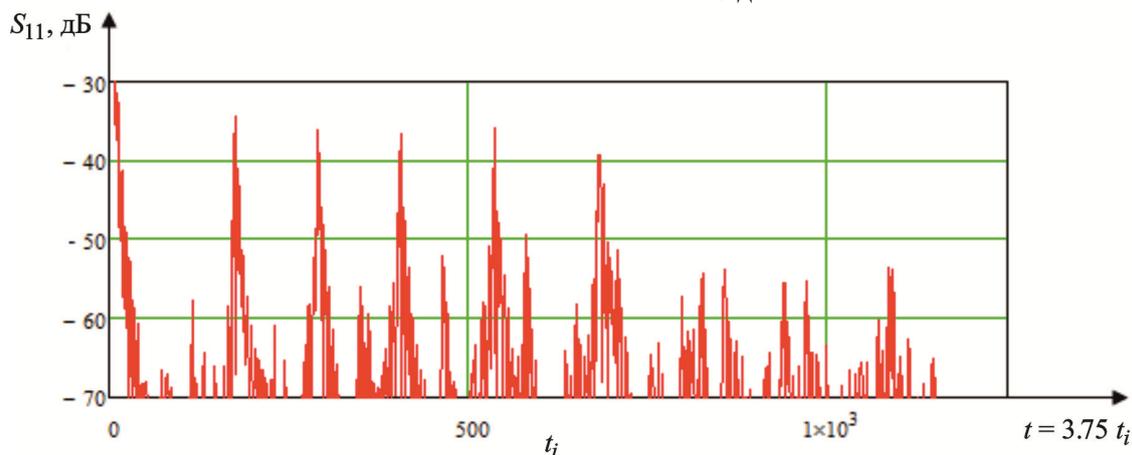


Рис. 10. Метка М100 с отражателями в виде ВШП, толщина напыления 1350 ангстрем

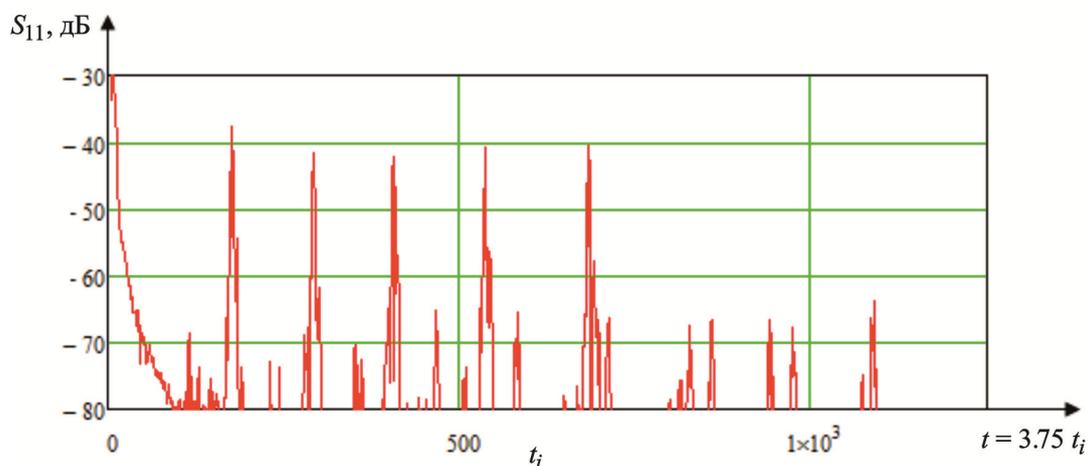


Рис. 11. Метка М100 с отражателями в виде ВШП, толщина напыления 1100 ангстрем

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Поэтому наиболее целесообразно для меток с малым числом отражателей использовать толщину напыления 1350 ангстрем, так как вносимые потери меток с толщиной напыления 1350 ангстрем не превышают 35–36 дБ, а вносимые потери меток с толщиной напыления 1100 ангстрем равны 38–42 дБ.

Как видно для меток с восемью отражателями (рис. 12–13), предпочтительнее оказывается толщина напыления 1100 ангстрем, поскольку динамический диапазон при толщине напыления 1350 ангстрем уменьшается до 12–13 дБ.

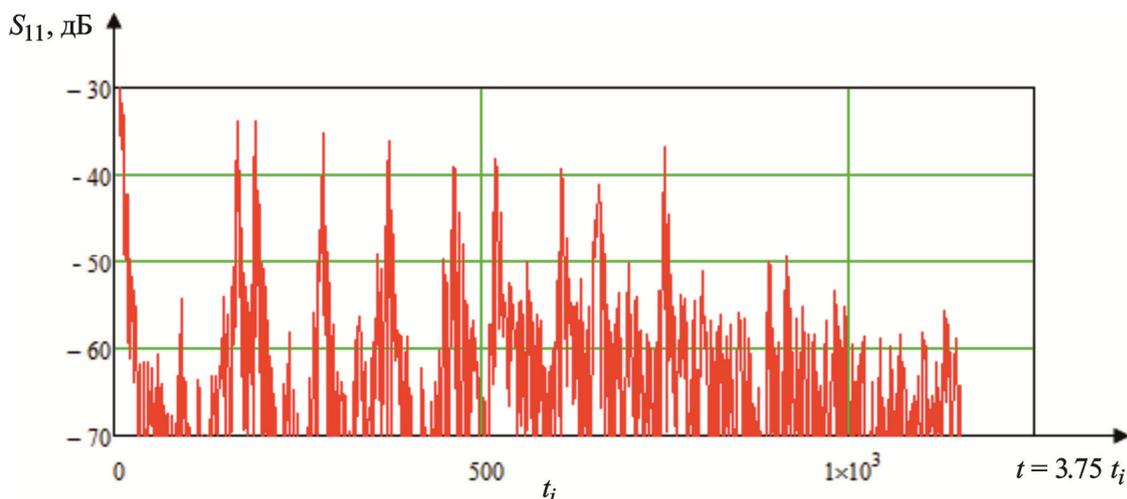


Рис. 12. Метка M99 с отражателями в виде ВШП, толщина напыления 1350 ангстрем

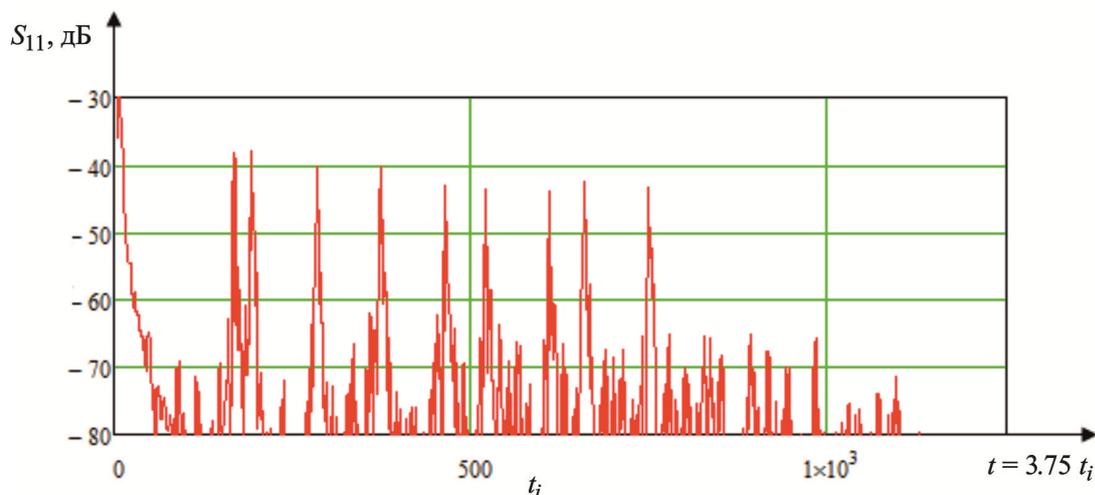


Рис. 13. Метка M99 с отражателями в виде ВШП, толщина напыления 1100 ангстрем

В то же время при выполнении отражателей в виде полосков и толщине напыления 1100 ангстрем также получается равномерный импульсный отклик (рис. 14–16), но с вносимыми потерями около 50 дБ, что на 10 дБ больше, чем при отражателях в виде ВШП.

Как видно, каждая метка имеет 16 хорошо различимых выбросов, причем разброс амплитуды не превышает 3 дБ, и их амплитуда не убывает по мере удаления от приемопередающего ВШП. Это означает, что коэффициент отражения у отражателей возрастает по мере удаления от приемопередающего ВШП,

что компенсирует убывания амплитуды ПАВ при распространении ПАВ через отражательную структуру. Вносимые потери лежат в районе 50 дБ. Динамический диапазон равен 17 дБ, так как ниже 67 дБ уже видны паразитные отклики, обусловленные переотражениями внутри отражательного массива.

Таким образом, толщина напыления зависит от числа отражателей в метках и подбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальные вносимые потери и максимальный динамический диапазон.

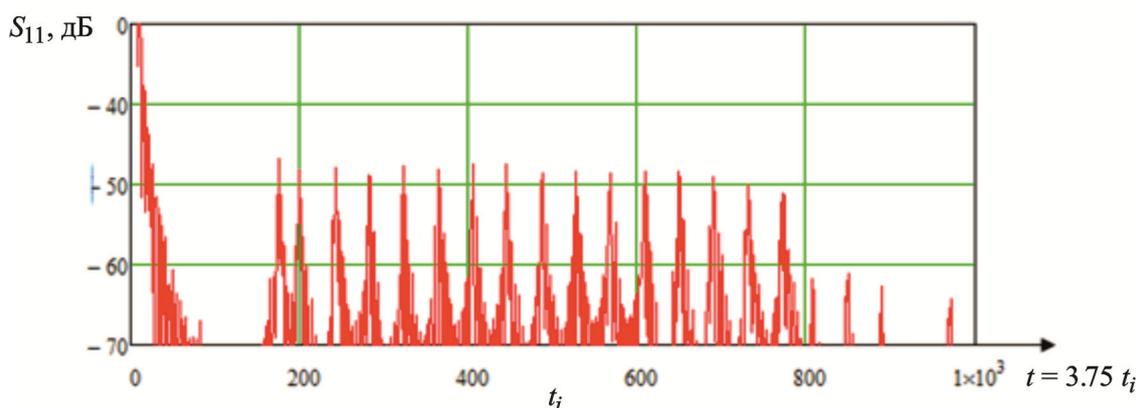


Рис. 14. Метка M95 с отражателями в виде полосков вместо ВШП, толщина напыления 1100 ангстрем

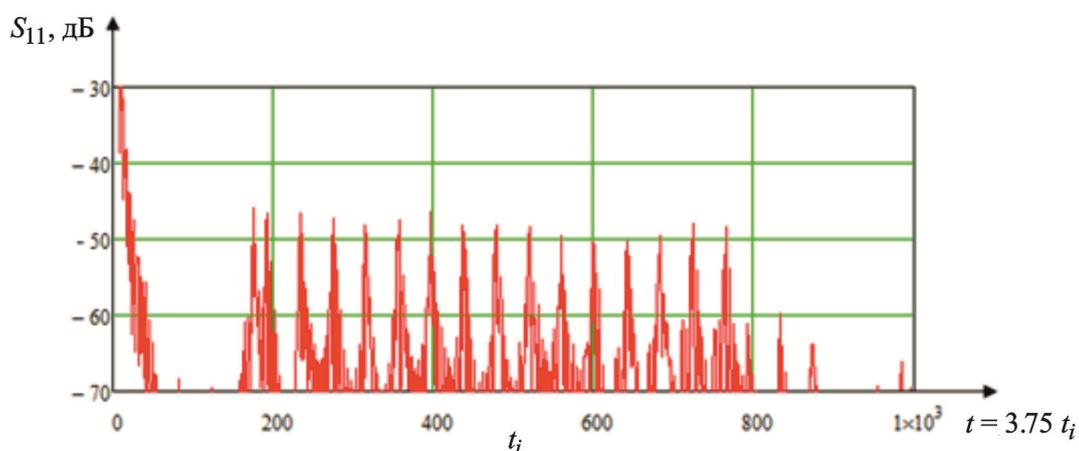


Рис. 15. Метка M94 с отражателями в виде полосков вместо ВШП, толщина напыления 1100 ангстрем

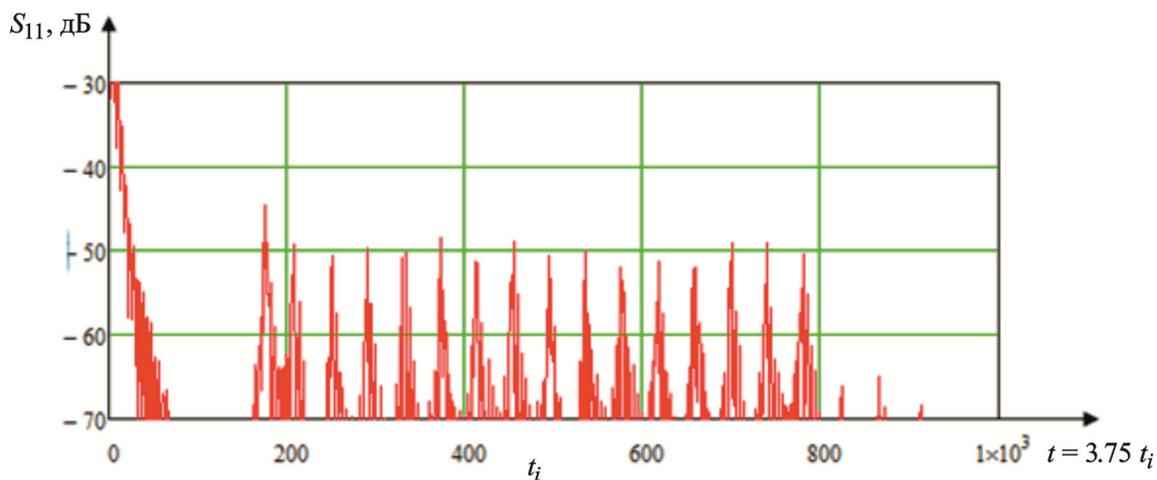


Рис. 16. Метка M96 с отражателями в виде полосков вместо ВШП, толщина напыления 1100 ангстрем

Решение коллизий (одновременное считывание нескольких меток)

Существует возможность одновременного считывания нескольких меток, если использовать так называемые ортогональные коды. Такие коды легко получить, располагая отражате-

ли в различных метках таким образом, чтобы отражатели с одним и тем же номером (отсчет начинается от ВШП) располагались в разных временных положениях относительно друга друга в пределах каждого отражательного массива (см. рис. 2). В этом случае произведение каждой пары кодов друг на друга всегда равно нулю,

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ МЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

поскольку единицы одного кода всегда попадают на нули другого. При максимальном числе ортогональных кодов кодовые посылки заполнят все пространство, принадлежащее кодовым последовательностям от первого до шестого отражательных массивов, т.е. получится код, состоящий из одних единиц, и их число будет равно числу отражателей во всех отражательных массивах (в данном случае 120, т.е. сумма кода равна 120). Исчезновение кодовой последовательности хотя бы от одной метки приведет в этом случае к появлению нулей в кодовой последовательности, что легко будет обнаружено. Более того, зная заранее эту кодовую последовательность, ее легко можно будет распознать (ту, которая исчезла), что важно при контроле грузов при их транспортировке. То же самое можно будет сделать, если исчезнет не одна, а несколько кодовых последовательностей, поскольку все кодовые последовательности заранее известны и могут быть восстановлены путем вычитания. Число ортогональных кодов можно определить из выражения N/m , где N – максимальное число 1 во всей кодовой последовательности ($N = 120$), m – максимальное число 1 в кодовой последовательности метки ($m = 1 \dots 13$). Так, например, при $m = 1$ число ортогональных кодов равно 120 (это коды, содержащие только одну единицу (один отражатель)), при $m = 6$ число ортогональных кодов равно 20 (это коды, в которых может содержаться до шести единиц (шести отражателей)) и т.д. Кроме того, ортогональными будут также коды, в которых максимальное число 1 может быть различным от метки к метке. В этом случае число ортогональных кодов при фиксированном числе 1 ($N = 120$) будет находиться между числом ортогональных кодов с минимальным числом 1 и числом ортогональных кодов с максимальным числом 1 в коде метки.

Так, например, число ортогональных кодов при числе отражателей 16 равно 4. Вычислим функцию корреляции этих кодов в виде

$$q_i = \sum_{i=100}^{1023} \left(\sqrt{h_i^2} \cdot \sqrt{h_i^2} \right), \quad q = \frac{q_i}{\sum_{i=100}^{1023} h_i^2},$$

нормированную на 1, т.е. если коды совпадают, то $q = 1$.

Функция q для кодов 94 и 95 равна 0.258, для кодов 94 и 96 $q = 0.131$, а для кодов 95 и 96 $q = 0.212$. Как видно, значение q значительно меньше 1, т.е. коды могут быть легко распознаны. При числе отражателей, равном шести, число ортогональных кодов составляет 20. Тогда для кода M106 и M104 функция $q = 0.242$, что много меньше 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкция и технология изготовления радиочастотных 64-битных идентификационных меток на ПАВ. Показано, что использование полосков в отражателях вместо ВШП повышает равномерность импульсных откликов, но приводит к росту вносимых потерь.

Метки позволяют легко различать ортогональные коды, поскольку имеют достаточный динамический диапазон и приемлемый уровень шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудин М., Зайцев В. Технология RFID: реалии и перспективы // Компоненты и технологии, 2003. № 4. С. 42–44.
2. Карапетьян Г.Я., Багдасарян С.А., Нефедова Н.А. Однонаправленный преобразователь поверхностных акустических волн. Патент на изобретение 2195069, приоритет 08.04.2002. БИ № 35. 2002.
3. Карапетьян Г.Я., Розовская Т.В. Пассивная радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах в диапазоне частот 860–890 МГц // Общие вопросы радиоэлектроники, 2008. Вып. 1. С. 251–257.
4. Clinton S. Hartmann. A Global SAW ID Tag with Large Data Capacity // Proceedings of 2002 IEEE Ultrasonics Symposium Munich, Germany, October, 2002.
5. Кислицын В.О., Калинин В.А., Карапетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Ермолаева Н.В. Чувствительные элементы пассивных беспроводных датчиков на поверхностных акустических волнах для измерения тока в трехфазных цепях // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2020. Т. 9. № 2. С. 177–183.
6. Кислицын В.О., Карапетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Середин Б.М., Ермолаева Н.В. Датчик температуры на поверхностных акустических волнах на основе линии задержки и резонатора // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2022. Т. 11. № 6. С. 450–456.

STUDY OF RADIO-FREQUENCY IDENTIFICATION MARKS ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

V.O. Kislitsyn^{a,*}, B.M. Seredin^b, G.Ya. Karapetyan^c, V.F. Kataev^{d,**}, N.V. Ermolaeva^{d,}***

^a Scientific–Technical Center Rus, St. Petersburg, 199178, Russia

^b Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russia

^c Southern Federal University, 344090, Russia

^d Volgodonsk Engineering-Technical Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Volgodonsk, Rostov region, 347360 Russia

**e-mail: kislitsyn@rfsaw.ru*

***e-mail: kataev.v.f.@gmail.com*

****e-mail: ermolv@mail.ru*

Received June 13, 2023; revised June 15, 2023; accepted June 20, 2023

An experimental study of the use of lithium niobate substrates for radio frequency identification 64-bit tags on surface acoustic waves (SAW) in the frequency band of 33 MHz at the center frequency of 870 MHz was carried out. Marks make it easy to distinguish between orthogonal codes, since they have sufficient dynamic range and an acceptable noise level. Aspects of manufacturing technology and the effect of spraying reflectors in marks on the main parameters of products are considered. It is shown that the use of strips in reflectors instead of IDTs improves the uniformity of impulse responses, but leads to an increase in insertion loss. RFID tags were studied, in which the deposition thickness of the aluminum film, from which the IDT and reflectors were made, had different thicknesses. Studies have shown that the deposition thickness has a significant effect on the electrical parameters of the label. The deposition thickness depends on the number of reflectors in the marks and is selected in such a way as to ensure minimum insertion loss and maximum dynamic range. The technology is selected in such a way that, with a high probability, responses are obtained with an unevenness of no more than 3 dB, insertion loss in the range of 38–40 dB.

REFERENCES

1. *Gudin M., Zaitsev V.* RFID technology: research and prospects. *Computers and Technologies*. 2003. No. 4. Pp. 42–44.
2. *Karapetyan G.Ya., Bagdasaryan S.A., Nefedova N.A.* Unidirectional converter of surface acoustic waves. Patent for invention 2195069, priority 08.04.2002 BI. No. 35. 2002.
3. *Karapetyan G.Ya., Rozovskaya T.V.* Passive radio frequency identification tag on surface acoustic waves in the frequency range of 860–890 MHz. *General issues of radio electronics*. 2008. Vol. 1. Pp. 251–257.
4. *Clinton S. Hartmann.* A Global SAW ID Tag with Large Data Capacity // *Proceedings of 2002 IEEE Ultrasonics Symposium Munich, Germany, October, 2002.*
5. *Kislitsyn V.O., Kalinin V.A., Karapetyan G.Ya., Kataev V.F., Ermolaeva N.V.* Chuvstvitel'nye elementy passivnykh besprovodnykh datchikov na poverhnostnykh akusticheskikh volnakh dlya izmereniya toka v trekhfaznykh cepyah [Sensitive elements of passive wireless sensors based on surface acoustic waves for current measurement in three-phase circuits]. *Vestnik NIYaU MIFI*. 2020. Vol. 9. No. 2. Pp. 177–183 (in Russian).
6. *Kislitsyn V.O., Karapetyan G.Ya., Kataev V.F., Seredin B.M., Ermolaeva N.V.* Datchik temperatury na poverhnostnykh akusticheskikh volnakh na osnove linii zaderzhki i rezonatora [Surface acoustic wave temperature sensor based on delay line and resonator]. *Vestnik NIYaU MIFI*. 2022. Vol. 11. No. 6. Pp. 450–456 (in Russian).