

МАЛОГАБАРИТНЫЕ РАДИОЧАСТОТНЫЕ МЕТКИ НА ПАВ РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

А.Багдасарян^{*}, д.т.н., профессор, bas@niir.ru, С.Багдасарян^{**}, к.т.н., В.Днепровский^{***}, к.т.н., Г.Карапетьян^{***}, к.т.н., С.Николаева^{**}

В системах на основе технологии РЧИ в качестве установленных на контролируемых стационарных и подвижных объектах датчиков используются радиочастотные метки, содержащие идентификационную информацию об объекте. Радиочастотные метки на поверхностных акустических волнах (ПАВ), обладающие большими потенциальными преимуществами по сравнению с полупроводниковыми радиочастотными метками, являются ключевыми элементами систем радиочастотной идентификации. Они определяют такие важнейшие параметры, как помехозащищенность, множественный доступ, зона покрытия, дальность действия, точность идентификации и др. Уменьшение массогабаритных характеристик меток-датчиков, а следовательно, и их стоимости – очень важная задача. Новая конструкция радиочастотной идентификационной метки с встречно-штыревым направленным ответвителем позволяет уменьшить размеры метки. Особенность этого ответвителя – он переводит поверхностные акустические волны из одного акустического канала в другой в противоположном направлении.

В последнее время в России и за рубежом наблюдается устойчивый интерес к технологиям радиочастотной идентификации (РЧИ). Особое внимание обращает на себя стремительно развивающаяся ПАВ-технология и системы РЧИ на ее основе как уникальные и дающие неоспоримые преимущества и большие возможности по сравнению со своими аналогами [1-4].

В ближайшее время ожидается крупносерийный выпуск пассивных радиочастотных

идентификационных меток-датчиков на ПАВ для многих применений: для автоматизации процессов обработки и защиты информации [5], в системах контроля безопасности объектов [6], для аутентификации в беспроводных локальных сетях [7] и защиты информационных ресурсов [8], в системах почтовой связи и т.д. [9, 10]. Для таких применений уменьшение массогабаритных характеристик меток-датчиков, а следовательно, и их стоимости очень актуально.

Размеры звукопровода метки определяются:

- длиной кодовой последовательности. Так, например, для реализации кодовой последовательности в 128 бит длина звукопровода в направлении распространения ПАВ достигает нескольких тысяч длин (λ) поверхностных акустических волн. А это, помимо физических

* ФГУП Научно-исследовательский институт радио.

** ООО "Научно-производственное предприятие "Технологии радиочастотной идентификации и связи".

*** НИИ механики и прикладной математики им. И.И. Воровича Южного федерального университета.

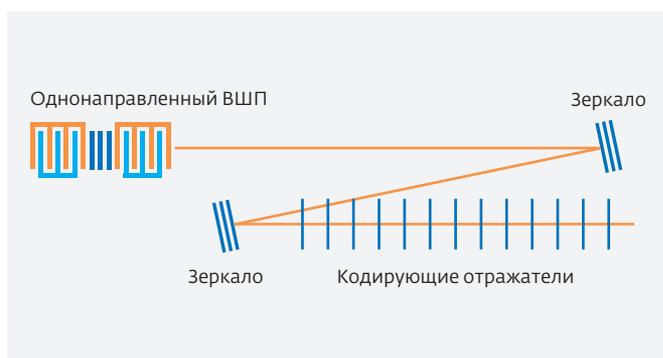


Рис.1. РЧИ-метка на ПАВ с отражателями

ограничений, связанных с дифракционной расходимостью ПАВ, приводит к значительному увеличению отношения величины кодовой последовательности к апертуре встречно-штыревого преобразователя (ВШП) и отражателей. Легко вычислить, что на центральной частоте 860 МГц на подложке из $YX/128^\circ$ -среза апертура приемопередающего ВШП, согласованного в 50-Ом тракте с антенной, составит 40λ. Соответственно, ширина звукопровода будет 1,2 мм (размеры шин 0,5 мм), тогда как длина 128-разрядного отражательного массива равна 24 мм. Очевидная низкая механическая прочность метки-датчика может привести к разрушению звукопровода даже при незначительных механических нагрузках и даже в том случае, когда звукопровод находится в герметичном корпусе. Это существенный недостаток, особенно для датчика давления с одновременной идентификацией;

- величиной защитного интервала - расстояния от приемопередающего ВШП до системы отражателей ПАВ, образующих кодовую последовательность. Защитный интервал определяет временную задержку около 1 мкс [11]. Такая величина временной задержки примерно вдвое увеличивает отношение величины кодовой последовательности к апертуре ВШП и отражателей (рис.1, 2).

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ РЧИ-МЕТОК

Задача уменьшения звукопровода за счет использования дополнительного акустического канала впервые была решена авторами работ [12, 13]. Рассмотрим подробнее. В работе [12] было предложено использовать отражатели, расположенные под углом к направлению распространения ПАВ (рис.1).

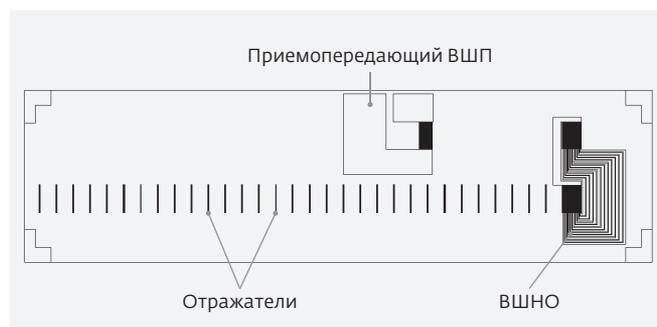


Рис.2. Конструкция РЧИ-метки на ПАВ с ответвителями

В этом случае ПАВ переходят из одного акустического канала в другой, где расположены отражатели. Помимо укорочения звукопровода происходит его расширение, что увеличивает его механическую прочность. В работе [12] также показано, что зеркальные полосковые отражатели вносят потери 15 дБ. Иными словами, метка с такими отражателями будет иметь повышенные вносимые потери, что снижает динамический диапазон, уменьшает дальность считывания и считается недостатком данной конструкции.

В работе [13] впервые было предложено вместо зеркал использовать ответвители, переводящие ПАВ из одного акустического канала в другой в направлении, повернутом на 180° . Эта метка состоит из приемопередающего ВШП, выполненного в соответствии с [14], и одного встречно-штыревого направленного ответвителя (ВШНО) [15].

Ответвитель переводит ПАВ из одного акустического канала в другой, в котором находятся отражатели (рис.2). ВШНО (рис.3) отличаются от многополосковых ответвителей (МПО) тем, что вместо полосков в них используются ВШП.

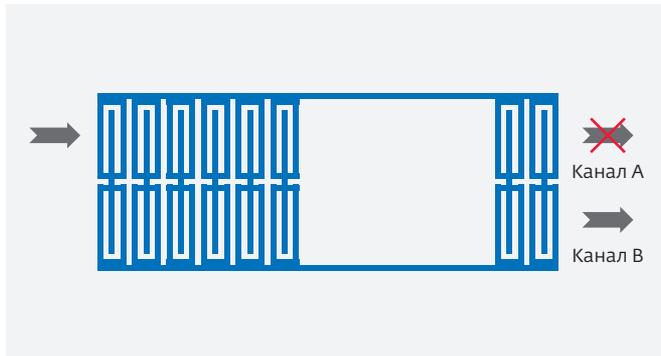


Рис.3. Встречно-штыревой направленный ответвитель

Из рис.3 хорошо видно, что между акустическими каналами А и В имеется переходная область, представляющая собой шины парциальных ВШП. Так как число таких переходных областей может быть много меньше числа электродов, излучение ПАВ в переходной области значительно ослабляется и не будет вызывать увеличения потерь в ответвителе при наличии в нем закруглений и переходных областей.

Еще одно преимущество данного ответвителя перед МПО заключается в том, что ВШП, входящие в состав ответвителя, делают их менее чувствительными к резистивным потерям в металлической пленке, из которой изготавливаются ВШП. Это, в свою очередь, уменьшает потери в ответвителе в целом.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЧИ-МЕТОК

Влияние резистивных потерь в металлической пленке электродов ВШП легко оценить, рассмотрев эквивалентные последовательную (рис.4а) и параллельную (рис.4б) схемы ВШП на частоте акустического синхронизма [16].

Приняты следующие обозначения элементов этих схем: $R_e = 4\rho W_{\max}/N\lambda_0$ – последовательное сопротивление электрода; $G_e = R_e(\omega_0 C_T)^2$ – параллельная проводимость электрода; ρ – удельное сопротивление пленки, из которой сделан ВШП, Ом/□; λ_0 – период ВШП; W_{\max} – апертюра ВШП; N – число пар электродов в ВШП; $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Наличие дополнительного сопротивления R_e (см. рис.4а) приводит к увеличению вносимого затухания ВШП, зависящего от отношения R_e/R_a или G_e/G_a , на относительную величину

$$\frac{1}{1+R_e/R_a} = \frac{1}{1+G_e/G_a} \quad (1)$$

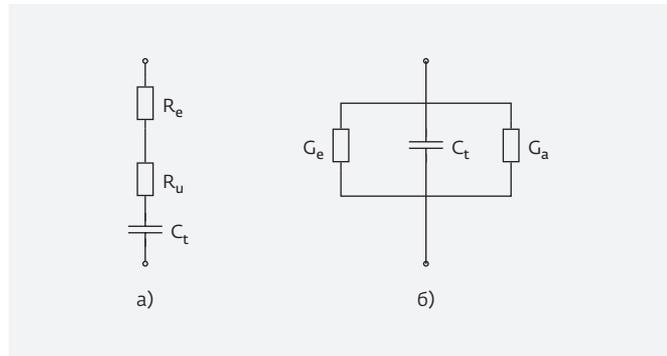


Рис.4. Эквивалентные схемы ВШП с учетом резистивных потерь

Зная выражение для G_e , находим отношение

$$\frac{G_e}{G_a} = \frac{4\rho\alpha_{\max}(\omega_0 C_T)^2}{N^3\lambda_0 8f_0 C_S} = \frac{\pi\rho\alpha_{\max}\omega_0 C_S}{Nk_{\text{эф}}^2} \quad (2)$$

где $C_S = C_T/N$ – емкость одного периода ВШП, $\alpha_{\max} = W_{\max}/\lambda_0$, $k_{\text{эф}}$ – коэффициент электромеханической связи.

Соотношение (2), очевидно, будет тем меньше, чем больше произведение $Nk_{\text{эф}}^2$. Это означает, что вносимое затухание, обусловленное резистивными потерями, существенно зависит от материала подложки и ширины полосы пропускания ВШП, которая пропорциональна $1/N$. Становится понятно, что широкополосные ВШП нельзя изготавливать на подложках из слабых пьезоэлектриков (где $Nk_{\text{эф}}^2 \ll 1$). В ВШП с полосами пропускания более 30%, даже в случае сильных пьезоэлектриков, нельзя пренебрегать этими потерями, так как произведение $Nk_{\text{эф}}^2$ не может быть достаточно большим при $N=2-5$. При апертурах $\alpha_{\max}=100$ имеем:

$$N^2k_{\text{эф}}^2 \approx 1, G_e/G_a = 70\pi\omega_0 C_S/Nk_{\text{эф}}^2.$$

При $\rho=0,7$ Ом/□ [17] получаем:

$$G_e/G_a = 70\pi\omega_0 C_S/Nk_{\text{эф}}^2 = 70\pi\omega_0 C_T/N^2k_{\text{эф}}^2.$$

Полагая $N^2k_{\text{эф}}^2 \ll 1$, получаем $G_e/G_a = 70\pi\omega_0 C_T$.

Если теперь $\omega_0 \approx 10^8$ с⁻¹, $C_T \approx 2 \cdot 10^{-11}$ Ф, то $G_e/G_a = 70\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,44$.

Дополнительное вносимое затухание, обусловленное резистивными потерями в электродах ВШП, определяется из выражения $V_{\text{доп}} = 20\lg(1+G_e/G_a)$ [16].

Подставляя $G_e/G_a = 0,44$, получаем $V_{\text{доп}} = 3,1$ дБ, т.е. для ВШП с относительными полосами пропускания, равными $k_{\text{эф}}$ и более, вносимое затухание, обусловленное резистивными потерями в электродах ВШП, составит не менее 3,1 дБ.

Для подложек из кварца ST-среза $k_{эф} = 0,04$, а для подложек из ниобата лития YZ-среза $k_{эф} = 0,21$. Многополосковый ответвитель можно рассматривать как предельный случай ВШНО, в котором ВШП имеет два электрода ($N = 0,5$). Поэтому для него всегда $Nk_{эф} \ll 1$, что приведет к дополнительному затуханию более 3,1 дБ. Можно подобрать N таким образом, чтобы $Nk_{эф} \approx 1$, т.е. уменьшить дополнительное затухание из-за резистивных потерь.

Как и для многополоскового ответвителя, падающую на ВШНО акустическую волну можно представить в виде симметричной и асимметричных мод [18]. При этом асимметричная мода не взаимодействует с парциальными ВШП ответвителя, находящимися в разных акустических каналах и параллельно соединенными друг с другом, так как наводит в них равные по величине противоположные токи, которые взаимно компенсируются. Симметричная мода воспринимает эти ВШП ответвителя как один парциальный ВШП с апертурой, равной сумме апертур ВШП в разных акустических каналах. На выходе этого ВШП поверхностная акустическая волна испытывает дополнительный сдвиг

фаз (ϕ), который можно определить из коэффициента прохождения ПАВ под ВШП (подробно в работе [19]). Иными словами, на выходе ВШП дополнительный сдвиг фаз ПАВ имеет вид:

$$\phi = G_a / \omega C_T. \quad (3)$$

Здесь G_a – активная составляющая проводимости ВШП

$$G_a = 8f_0 k^2 C_T N \left(\frac{\sin X}{X} \right)^2 \quad (4)$$

и

$$X = \pi N \frac{f - f_0}{f_0},$$

f_0 – центральная частота ВШП (частота акустического синхронизма), C_T – емкость парциального ВШП, N – число пар электродов парциального ВШП.

Если число ВШП – M , то общий сдвиг фаз симметричной моды составит:

$$\phi_{общ} = \frac{4}{\pi} k^2 N M \left(\frac{\sin X}{X} \right)^2. \quad (5)$$

Тогда частотная характеристика ВШНО имеет на выходе канала В следующий вид:

$$H(f) = \sin \left[\frac{2}{\pi} NMk^2 \left(\frac{\sin X}{X} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Очевидно, что при $\varphi_{\text{общ}} = \pi$ симметричная и асимметричная моды будут находиться в противофазе и ПАВ полностью перейдет из одного акустического канала в другой (так как $\sin(\pi/2) = 1$). На центральной частоте ВШП $X = 0$, а функция $(\sin X)/X = 1$. Тогда для 100%-го перехода ПАВ из одного акустического канала в другой $NM = \pi^2 / (4k^2) = N_0 M_0$.

Однако ПАВ, отраженные от парциальных ВШП, приводят к большой неравномерности в полосе пропускания фильтра. Коэффициент отражения от ВШНО можно вычислить по формуле:

$$K_{\text{отр}}(f) = \frac{\alpha}{M} \left[\sum_{i=0}^M \exp \left(\frac{4\pi j f}{f_0} \left\{ N_i + \sum_{k=0}^i \frac{\Delta X_k}{\lambda} \right\} \right) \right], \quad (7)$$

где α – коэффициент отражения от парциального ВШП, $N_i = N$ (число пар электродов во всех парциальных ВШП одинаковы), λ – период парциального ВШП (длина ПАВ на центральной частоте), ΔX_k – расстояние между ближайшими краями электродов соседних парциальных ВШП.

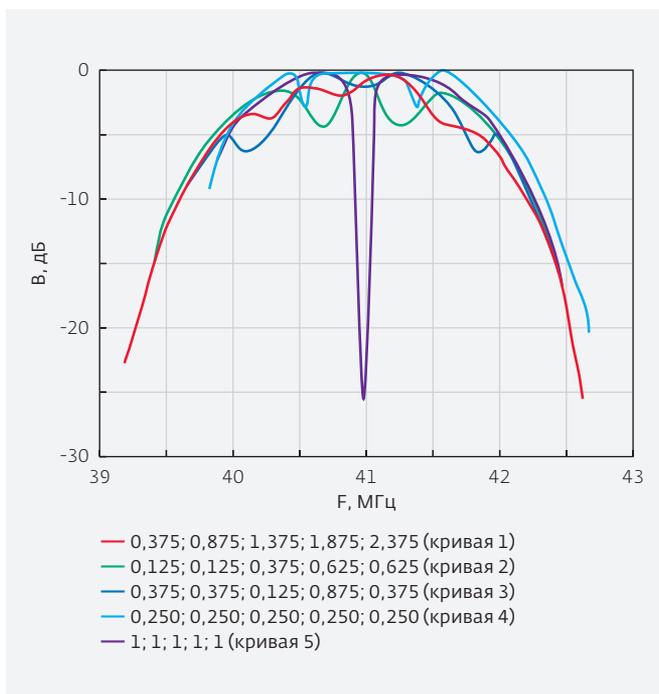


Рис.5. АЧХ ВШНО при различных расстояниях (кратных λ) между парциальными ВШП

Приведенные амплитудно-частотные характеристики ВШНО (рис.5) учитывают отражение ПАВ от парциальных ВШП при различных расстояниях между ними. Как видно из рисунка, неравномерность в полосе пропускания не превышает 3дБ, даже когда расстояния между ВШП различны (кривые 1-3). При одинаковых расстояниях, когда расстояние между ВШП кратно λ , в центре АЧХ появляется глубокий провал (кривая 5), так как отраженные ПАВ складываются в фазе. Если эти одинаковые расстояния кратны $\lambda/4$, то ПАВ, отраженные от соседних ВШП, складываются в противофазе. Поэтому на центральной частоте ответитель ПАВ почти не отражает (отсутствует провал на АЧХ ВШНО). Однако на тех частотах, где эти расстояния становятся кратными длине ПАВ, волны эффективно отражаются от ответителя, что приводит к появлению провалов на АЧХ (кривая 4). Имея такую зависимость, можно выбрать центральную частоту входного и выходного ВШП равной центральной частоте ответителя, но с полосой пропускания, которая меньше расстояния между провалами на АЧХ ВШНО (кривая 4).

Так как ВШНО должен переводить ПАВ в другой акустический канал в противоположном направлении, конструкция ответителя имеет вид, показанный на рис.6.

На этом рисунке показан фрагмент ответителя из трех секций. Парциальные ВШП имеют по семь электродов ($N = 3$). Реальный ВШНО имеет 11 секций, поэтому число перемычек равно 11. Это много меньше общего числа электродов, и, как следствие, излучение ПАВ на участках вне акустических каналов будет значительно ослаблено. Апертура парциальных ВШП равна апертуре приемопередающего ВШП.

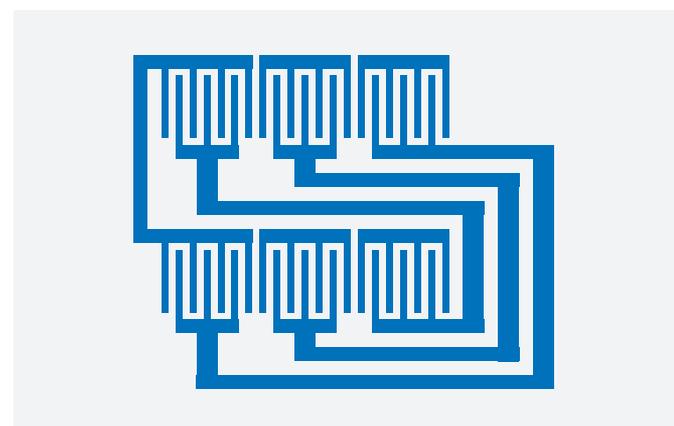


Рис.6. Фрагмент ВШНО, переизлучающего ПАВ в другой акустический канал (в противоположную сторону)

ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОК

Изготовление кристаллов акустоэлектронных меток проводилось по отработанной ранее наноразмерной технологии [20] с использованием оборудования для формирования пленок из различных материалов для акустоэлектроники [21]. Исследования кристаллов акустоэлектронных меток проводились также по отработанной методике измерений [17].

Импульсные отклики меток с ответвителем (сплошная синяя линия) и без него (пунктирная красная линия) показаны на рис.7. Видно, что вносимые потери этих меток практически не отличаются. Это свидетельствует о том, что ответвитель почти не вносит затухания, в отличие от отражателей. Выбросы на импульсном отклике, обусловленные отражением ПАВ от ответвителя, можно считать импульсом от опорного отражателя, в качестве которого используется ответвитель.

Таким образом, при центральной частоте метки 870 МГц для 128-разрядной метки длина звукопровода уменьшена на 4 мм – с 14 до 10 мм. На новую конструкцию радиочастотной идентификационной метки высокой разрядности получен патент. Разработаны принципы построения и изготовлены кристаллы акустоэлектронных меток с разрядностью 128 бит на основе ВШНО. Во всех образцах полученная неравномерность отраженных импульсов не превышает 3 дБ. Отражатели выполнены с убывающим коэффициентом отражения для компенсации затухания ПАВ в массиве отражателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гуляев Ю.В., Багдасарян С.А.** Радиочастотная идентификация с использованием технологии ПАВ. – Наука и технологии в промышленности, 2005, №1, с.54.
2. **Багдасарян С.А.** ПАВ-технологии в системах радиочастотной идентификации. – Электронная промышленность, 2004, №3, с.170.
3. **Бутенко В.В., Багдасарян С.А., Кащенко Г.А., Николаев О.В., Семенов Р.В.** Радиочастотная идентификация – перспективное направление развития радиоэлектронных систем. – Труды Научно-исследовательского института радио, 2010, №3, с. 80–84.
4. **Бутенко В.В., Багдасарян С.А., Семенов Р.В.** Принципы антиколлизии обработки сигналов в системах радиочастотной идентификации на основе ПАВ технологий. – Труды Научно-исследовательского института радио, 2012, №4, с.16–22.
5. **Гуляев Ю.В., Багдасарян А.С., Кащенко Г.А., Семенов Р.В.** Автоматизация процессов обработки и защиты информации в информационно-телекоммуникационных системах. – Информация и безопасность, 2008, т.11, №1, с.31–38.
6. **Багдасарян А.С., Кащенко Г.А., Семенов Р.В., Щербачев В.Б.** Создание автоматизированных систем контроля безопасности объектов на базе технологии радиочастотной идентификации. – Информация и безопасность, 2006, т.9, №2, с.83–85.
7. **Гуляев Ю.В., Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Кащенко Г.А., Семенов Р.В.** Аутентификация в беспроводных локальных сетях на основе устройств радиочастотной идентификации. – Информация и безопасность, 2007, т.10, №3, с.395–402.

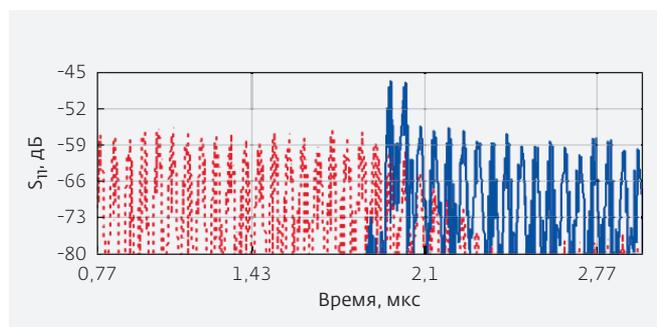
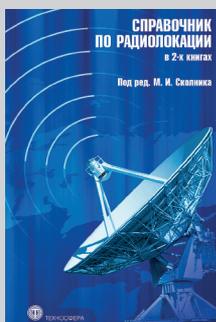


Рис.7. Импульсные отклики меток с ответвителем и без него

8. **Львович Я.Е., Багдасарян А.С., Кащенко Г.А., Семенов Р.В.** Концепция построения программного обеспечения системы автоматизированной радиочастотной идентификации для защиты информационных ресурсов. – Информация и безопасность, 2007, т.10, №1, с.165–168.
9. **Бутенко В.В., Багдасарян А.С.** Радиометки в системе контроля качества услуг почтовой связи. – Труды Научно-исследовательского института радио, 2011, №1, с.5–11.
10. **Гуляев Ю.В., Багдасарян А.С., Бутенко В.В., Кащенко Г.А., Семенов Р.В.** Радиочастотная идентификация: современное состояние, области применения и тенденции развития. – Информация и безопасность, 2007, т.10, №2, с.199–222.
11. Патент на изобретение RUS №2296950. 03.09.2004. Датчик дистанционного контроля физической величины на поверхностных акустических волнах/Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Гуляев Ю.В., Карапетян Г.Я.
12. **Härmäa S., Plessky V.P., Hartmann C.S., Steichen W.** SAW RFID tag with reduced size. – IEEE Ultrasonics Symposium, 2006, p.2389–2392.
13. Патент на изобретение RUS №2344440 от 30.10.2006. Устройство радиочастотной идентификации на поверхностных акустических волнах./Багдасарян С.А., Багдасарян А.С., Карапетян Г.Я., Нефедова Н.А.
14. Патент на изобретение RUS №2195069 от 08.04.2002. Однонаправленный преобразователь поверхностных акустических волн./Карапетян Г.Я., Багдасарян С.А. Нефедова Н.А.
15. Авторское свидетельство СССР №1699327 от 15.08.1991. Акустоэлектронное устройство на поверхностных акустических волнах./Карапетян Г.Я., Банков В.Н., Орлова Л.В., Багдасарян А.С.
16. **Багдасарян А.С., Карапетян Г.Я.** Импедансные фильтры на поверхностных акустических волнах. – М.: Изд-во Международная программа образования. 1998.
17. **Багдасарян А., Багдасарян С., Бутенко В., Карапетян Г.** Радиочастотные метки на ПАВ. Особенности конструкции и технологии. – Электроника: НТБ, 2012, №7, с.76–82.
18. **Багдасарян А.С., Карапетян Г.Я.** Встречно-штыревые направленные ответвители ПАВ и фильтры на их основе. – Средства связи, 1988, вып.4, с.20–22.
19. **Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Богданов М.И., Днепровский В.Г., Карапетян Г.Я., Петин Г.П.** Беспроводный пассивный датчик на поверхностных акустических волнах для измерения физических величин. – Материалы XV Международной конференции "Современные проблемы механики сплошной среды", Ростов-на-Дону, 12–15 декабря 2011 г., с.72–75.
20. **Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Житковский В.Д., Багдасарян А.С.** Наноструктурные углеродные материалы в тонкопленочной технологии. – Инженерная физика, 2004, №1, с.33.
21. **Белянин А.Ф., Гуляев Ю.В., Самойлович М.И., Багдасарян А.С.** Оборудование для формирования пленок алмаза и алмазоподобных материалов для акустоэлектроники. – Наука и технологии в промышленности, 2006, №4, с.19.

ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ



СПРАВОЧНИК ПО РАДИОЛОКАЦИИ

Под ред. М.И. Скольника

Москва: Техносфера, 2014, ISBN 978-5-94836-381-3
Книга 1 – 672 с.; книга 2 – 696 с.

При поддержке открытого акционерного общества "Концерн радиостроения "Вега"
Перевод с англ. под общей ред. д.т.н., проф. В.С.Вербы

Это третье издание всемирно известного "Справочника по радиолокации". В нем нашли отражение новые усовершенствованные технологии радиолокации. Некоторые темы предыдущих изданий справочника, утратившие свою актуальность, были исключены из настоящего издания.

Справочник является результатом усилий как специалистов по общим вопросам, так и экспертов по специальным разделам радиолокации.

Книга будет полезна для инженеров, участвующих в разработке, производстве и эксплуатации радиолокационных систем.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319 Москва, а/я 91; ☎ (495) 956-3346, 234-0110; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru

