

УДК 534.08

ВЛИЯНИЕ ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ, НАНЕСЕННОЙ НА РЕЗОНАТОР С ПОПЕРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ, НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

© 2021 г. Б. Д. Зайцев¹*, А. А. Теплых¹, А. П. Семёнов¹, И. А. Бородина¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Саратовский филиал, Саратов, Россия

*E-mail: zai-boris@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 26.02.2021 г.

Теоретически и экспериментально исследовано влияние толщины, коэффициентов упругости и вязкости, а также электрической проводимости пленки, нанесенной на свободную сторону пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем, на его характеристики. Показано, что увеличение механического импеданса пленки и ее проводимости снижают максимальное значение реальной части электрического импеданса резонатора.

DOI: 10.31857/S0367676521060272

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время огромный интерес исследователей вызывают пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем [1–7]. Этот интерес связан с тем, что акустические датчики, основанные на указанных резонаторах, имеют ряд преимуществ по сравнению с резонаторами с продольным электрическим полем. Электроды резонатора с поперечным полем располагаются на одной стороне пьезоэлектрической пластины, и электрическое поле существует не только в пластине, но и в прилегающей к резонатору среде. Такая конструкция резонатора позволяет создавать на его основе датчики для определения вязкости и проводимости контактирующей жидкости [6], а также биологические датчики для исследования микробных клеток в жидкой фазе [8] без использования иммобилизованных специфичных реагентов и датчики для определения резистентных свойств бактерий [9]. Показана возможность создания решетки таких резонаторов с хорошей акустической развязкой [10]. Было исследовано влияние бесконечно тонкой проводящей пленки на характеристики таких резонаторов и показана возможность бесконтактного измерения поверхностной проводимости [11] и микроперемещений [12] тонких пленок. Была также показана возможность создания газового датчика на основе резонатора с поперечным электрическим полем с газочувствительной пленкой хитозана [13, 14]. Было установлено, что в присутствии па-

ров летучих жидкостей проводимость пленки увеличивается примерно на 1–2 порядка, и при этом наблюдается незначительное ее набухание, т.е. изменение ее толщины [13]. В работе [14] показано, что в присутствии паров летучих жидкостей кроме проводимости меняются модули упругости пленки хитозана и ее вязкость.

В настоящей работе впервые исследовано влияние толщины, модулей упругости и коэффициента вязкости, а также проводимости пленки, нанесенной на свободную сторону пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем, на его характеристики.

ПОЛУЧЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ НИТРОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ЛАКА И ХИТОЗАНА–АЦЕТАТА

Была разработана технология создания механически прочных пленок на основе нитроцеллюлозного лака с микрочастицами графита и пленок хитозана–ацетата с помощью цилиндра и поршня из фторопласта с заданным диаметром. Для получения пленки выставлялась заданная глубина погружения поршня, и цилиндр заполнялся лаком или водным раствором хитозана до появления небольшого выпуклого мениска. После высыхания исходного материала поршень с пленкой выдвигался из цилиндра, и пленка легко снима-

Таблица 1. Механические характеристики исследуемых пленок

Материал пленки	$c_{11}, \cdot 10^9$ Па	$c_{44}, \cdot 10^9$ Па	$\eta, \cdot 10^{-9}$ с/рад	$\rho, \text{ кг/м}^3$
Пленка лака с графитом	7.229	3.277	181.5	1480
Пленка ацетата–хитозана	15.27	11.14	127.6	860

Таблица 2. Механические и электрические характеристики пленки хитозана–ацетата при различной концентрации (n) аммиака в воздухе

Концентрация аммиака, ppm	0	400	800	1200	1600
$c_{11}, \cdot 10^9$ Па	17.3	16.3	15.2	13.6	12.6
$c_{44}, \cdot 10^9$ Па	11.7	10.7	10.2	8.7	7.7
$\eta, \cdot 10^{-8}$ с/рад	8.6	9.0	10.6	13.3	15.9
$\sigma, \text{ мкСм/м}$	45.0	807.8	2941.3	5281.7	14094.3
ϵ/ϵ_0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

лась с поршня. После измерения толщины, диаметра и массы определялась плотность пленки (ρ). Затем пленка помещалась между прижимными электродами плоского конденсатора, и с помощью измерителя *LCR* параметров 4285A (Agilent) измерялась его емкость и проводимость. По известным поперечным размерам электродов и толщине пленки определялись удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость. После этого определялись коэффициенты упругости (c_{ij}) и вязкости (η) исследуемой пленки, в соответствии с методикой, изложенной в [15]. Для этого измерялись частотные зависимости модуля электрического импеданса резонатора в интервале частот 50–1450 кГц с шагом 100 Гц с помощью анализатора импедансов E4990A (Keysight). Резонатор представлял собой диск из пьезокерамики ЦТБС-3 диаметром 22 мм и толщиной около 2 мм с серебряными электродами, нанесенными на торцы диска. Полученные значения модулей упругости c_{11} и c_{44} , а также коэффициент вязкости η и плотность ρ исследуемых пленок приведены в табл. 1.

Как уже отмечалось, ранее были измерены модули упругости и коэффициент вязкости, а также диэлектрическая проницаемость и объемная проводимость пленок хитозана при различной концентрации аммиака (n) в воздухе [14]. Значения указанных параметров при различной концентрации аммиака в воздухе представлены в табл. 2. Указанные данные были использованы при теоретическом анализе характеристик резонатора с поперечным электрическим полем с пленкой, имеющей различные значения электрической

проводимости, толщины, модулей упругости и коэффициента вязкости.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОВОДИМОСТИ И ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАТОРА С ПОПЕРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Вначале по полученным механическим параметрам, которые представлены в табл. 1, был проведен теоретический анализ влияния одновременного изменения электрической проводимости и толщины пленки, нанесенной на свободную поверхность пьезоэлектрического резонатора с поперечным возбуждающим электрическим полем, на его характеристики. При этом проводимость пленки σ менялась произвольным образом в интервале 10^{-5} – 10^{-2} См/м. Анализировался резонатор из пьезокерамики ЦТС-19 с размерами $18 \times 20 \text{ мм}^2$, толщиной порядка 3 мм. Два бесконечно тонких проводящих электрода с размерами $7 \times 20 \text{ мм}^2$ располагались на одной стороне пластины с зазором 4 мм. Полярная ось пьезоэлектрика была ориентирована перпендикулярно зазору. В качестве анализируемых пленок использовались пленки на основе нитроцеллюлозного лака с микрочастицами графита и пленки хитозана–ацетата. Анализ проводился методом конечных элементов [16] в предположении, что в направлении, перпендикулярном полярной оси, структура считалась бесконечной.

На рис. 1 представлены зависимости частоты параллельного резонанса F_{par} (рис. 1а) и макси-

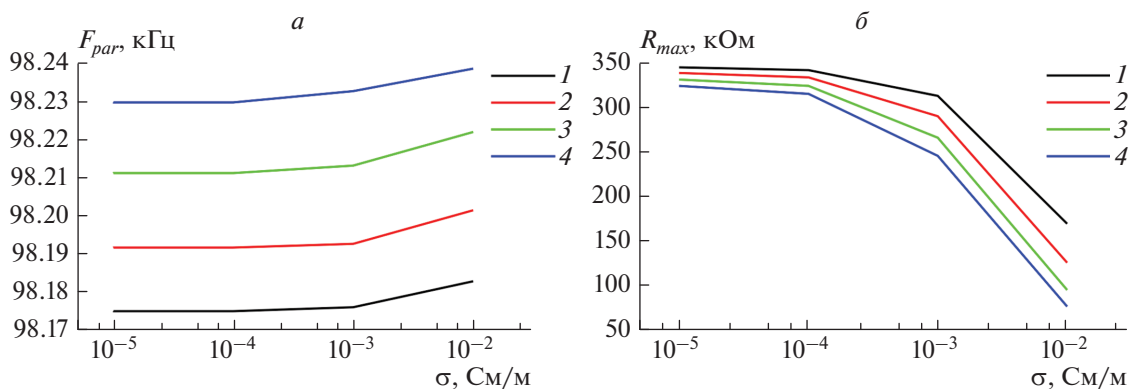


Рис. 1. Зависимости частоты параллельного резонанса F_{par} (а) и значения R_{max} на этой частоте (б) от проводимости пленки ацетата–хитозана для различных значений толщины пленки: 1 – 60, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200 мкм.

мального значения реальной части электрического импеданса R_{max} на этой частоте (рис. 1б) от проводимости σ пленки ацетата–хитозана для различных значений ее толщины для резонанса вблизи 98 кГц. Видно, что с ростом толщины пленки от 60 до 200 мкм при фиксированном значении электрической проводимости частота параллельного резонанса увеличивается на 0.06%. При этом значение R_{max} уменьшается на 22%. При изменении проводимости от 10^{-5} до 10^{-2} См/м максимальное значение реальной части электрического импеданса уменьшается на 75–50%. В этом случае изменение резонансной частоты не превышает 0.03%.

Аналогичные результаты были получены для пленок из нитроцеллюлозного лака. С ростом толщины пленки от 150 до 300 мкм при фиксированном значении электрической проводимости частота параллельного резонанса уменьшается на 0.2%. Значение R_{max} при этом снижается на 10–20%.

При изменении проводимости от 10^{-5} до 10^{-2} См/м максимальное значение реальной части электрического импеданса уменьшается на 77%, а изменение резонансной частоты не превышает 0.04%.

Таким образом, исследование показало, что увеличение толщины пленки и увеличение ее проводимости приводят к существенному уменьшению реальной части импеданса на резонансной частоте, т.е. эти два эффекта всегда усиливают друг друга.

В соответствие с данными табл. 2 были также рассчитаны частота параллельного резонанса и значение реальной части электрического импеданса на этой частоте от концентрации аммиака (n) в воздушной смеси. Эти зависимости представлены кривыми 2 на рис. 2 и 3, соответственно. Видно, что с ростом концентрации аммиака резонансная частота незначительно уменьшается (рис. 2), а значение R_{max} меняется весьма существенно (рис. 3). Таким образом, уменьшение моду-

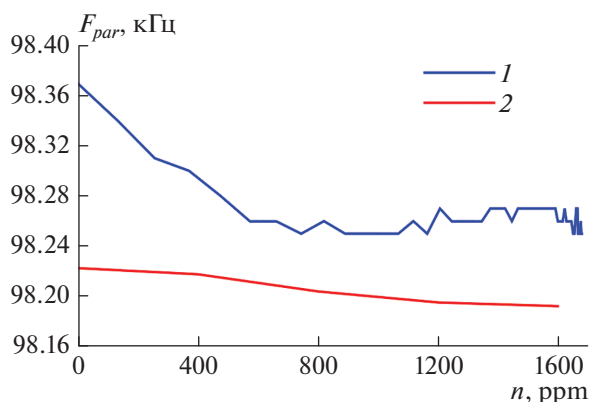


Рис. 2. Зависимость частоты параллельного резонанса F_{par} от концентрации аммиака n в воздухе для резонатора с поперечным электрическим полем и пленкой ацетата–хитозана. 1 – Эксперимент, 2 – теория.

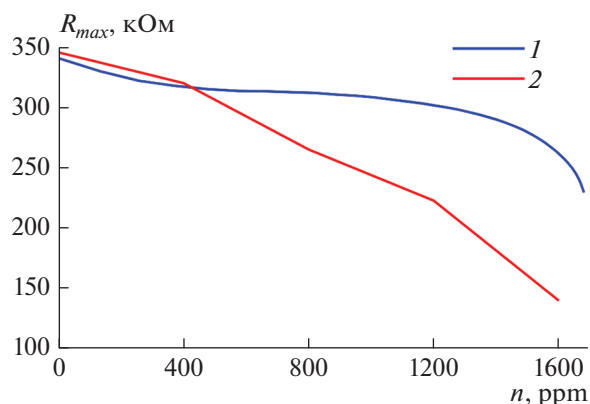


Рис. 3. Зависимость значения R_{max} от концентрации n аммиака в воздухе для резонатора с поперечным электрическим полем и пленкой ацетата–хитозана. 1 – Эксперимент, 2 – теория.

Таблица 3. Теоретические и экспериментальные значения резонансной частоты (F_{par}) и максимального значения реальной части электрического импеданса (R_{max}) резонатора с поперечным электрическим полем с пленкой лака с графитом и пленкой хитозана ацетата на воздухе

Материал пленки	F_{par} , кГц теория	F_{par} , кГц эксперимент	R_{max} , кОм теория	R_{max} , кОм эксперимент
Пленка лака с графитом	97.966	98.06	336	318
Пленка хитозана–ацетата	98.174	98.42	344	345

лей упругости (на 30%) при увеличении коэффициента вязкости (на 85%) и увеличении проводимости (на 2 порядка) приводят к уменьшению R_{max} на 60%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛЕНОК НА РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАТОРА С ПОПЕРЕЧНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Были проведены эксперименты с пленками нитроцеллюлозного лака с микрочастицами графита и с пленкой хитозана–ацетата на воздухе, которые были приклеены на свободную сторону резонатора с поперечным электрическим полем на основе керамики ЦТС-19. Геометрические размеры резонатора в точности соответствовали размерам, которые использовались в расчете. Измеренные значения резонансной частоты F_{par} и максимального значения реальной части электрического импеданса (R_{max}) приведены в табл. 3 для пленки нитроцеллюлозного лака с графитом и пленки ацетата–хитозана на воздухе. Здесь же приведены теоретические значения указанных параметров, которые оказались в хорошем соответствии с теорией (максимальное расхождение не превосходит 5.5%).

Были проведены эксперименты по исследованию одновременного изменения проводимости и акустических параметров пленки на характеристики резонатора с поперечным электрическим полем. Для этой цели резонатор с пленкой хитозана–ацетата помещался в камеру с изменяющейся концентрацией аммиака что, как показано в [14], приводило к изменению модулей упругости, коэффициента вязкости и проводимости пленки. В результате были измерены зависимости резонансной частоты F_{par} и R_{max} от концентрации аммиака. Эти экспериментальные зависимости представлены кривыми 1 на рис. 2 и 3, соответственно. Видно, что теоретическая и экспериментальная зависимости находятся в хорошем качественном соответствии друг с другом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование показало, что увеличение толщины пленки и увеличение ее проводимости приводят к незначительно-

му увеличению резонансной частоты и к уменьшению реальной части импеданса на резонансной частоте для резонатора с поперечным электрическим полем, т.е. эти два эффекта всегда усиливают друг друга.

Исследование резонатора с поперечным электрическим полем и пленкой хитозана в воздушной смеси воздуха с аммиаком показало, что уменьшение модулей упругости пленки и возрастание коэффициента вязкости и электрической проводимости уменьшают резонансную частоту и максимальное значение реальной части электрического импеданса резонатора. При этом, уменьшение модулей упругости c_{11} и c_{44} на ~30% и увеличение коэффициента вязкости на 85% и электрической проводимости примерно на два порядка (при изменении концентрации аммиака n от 0 до 1600 ppm) меняют указанные величины на 0.1 и 60%, соответственно.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-07-00300 и № 20-07-00602). Авторы благодарны Федорову Ф.С. за помощь в приготовлении пленок хитозана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vetelino J.F.* // Proc. 2010 IEEE Ultrason. Symp. 2010. P. 2269.
2. *Zhang Z., Wang W., Ma T. et al.* // Proc. 2009 IEEE Ultrason. Symp. 2009. P. 655.
3. *Ma T., Zhang Z., Wang W. et al.* // Proc. 2009 IEEE Ultrason. Symp. 2009. P. 2511.
4. *Ma T., Wang J., Du J. et al.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 2013. V. 60. P. 864.
5. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M. et al.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 2014. V. 60. P. 166.
6. *Zaitsev B., Shikhabudinov A., Teplykh A., Kuznetsova I.* // Ultrason. 2015. V. 63. P. 179.
7. *Зайцев Б.Д., Шихабудинов А.М., Теплых А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 10. С. 1350; *Zaitsev B.D., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. No. 10. P. 1218.
8. *Guliy O.I., Zaitsev B.D., Borodina I.A. et al.* // Anal. Biochem. 2018. V. 554. P. 53.

9. Гулий О.И., Зайцев Б.Д., Караваева О.А. и др. // Антибиот. химиотер. 2019. Т. 64. С. 3; Guliy O.I., Zaitsev B.D., Karavaeva O.A. et al. // Antibiot. Chemother. 2019. V. 64. P. 3.
10. Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. С. 1442; Borodina I.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 10. P. 1283.
11. Zaitsev B.D., Semyonov A.P., Teplykh A.A., Borodina I.A. // Ultrason. 2019. V. 94. P. 169.
12. Zaitsev B.D., Semyonov A.P., Teplykh A.A., Borodina I.A. // Ultrason. 2019. V. 99. Art. No. 105973.
13. Zaitsev B., Fedorov F., Semyonov A. et al. // Proc. 2019 IEEE Ultrason. Symp. 2019. P. 607.
14. Zaitsev B., Teplykh A., Fedorov F. et al. // Sensors. 2020. V.20. Art. No. 2236.
15. Teplykh A., Zaitsev B, Borodina I et al. // ITM Web of Conf. 2019. V. 30. Art. No. 07002.
16. Teplykh A.A., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E. // Sens. Transducers. 2015. V. 184. P. 60.

Influence of a conducting film with finite thickness applied to a resonator with a lateral electric field on its characteristics

B. D. Zaitsev^{a,*}, A. A. Teplykh^a, A. P. Semyonov^a, I. A. Borodina^a

^a*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch, Saratov, 410019 Russia*

**e-mail: zai-boris@yandex.ru*

The effect of the thickness, elasticity and viscosity coefficients, as well as the electrical conductivity of a film deposited on the free side of a piezoelectric resonator with a lateral electric field on its characteristics has been studied theoretically and experimentally. It is shown that an increase in the mechanical impedance of the film and its conductivity decrease the maximum value of the real part of the electrical impedance of the resonator.