——— ПРИБОРЫ ——

УДК 621.389

КОНДЕНСАТОРНЫЙ МЭМС-МИКРОФОН

© 2020 г. Д. М. Григорьев^{*a*, *, С. С. Генералов^{*a*}, С. А. Поломошнов^{*a*}, С. В. Никифоров^{*a*}, В. В. Амеличев^{*a*}}

^аФедеральное государственное бюджетное научное учреждение "Научно-производственный комплекс "Технологический центр", площадь Шокина, 1, стр. 7, Москва, 124498 Россия

> *e-mail: D. Grigorev@tcen.ru Поступила в редакцию 06.05.2019 г. После доработки 30.07.2019 г. Принята к публикации 30.07.2019 г.

Рынок МЭМС-микрофонов растет с каждым годом. Показатель совокупного среднегодового темпа роста составляет 11.7%. Это связано с увеличением устройств использующих голосовое управление, увеличением количества микрофонов в смартфонах и увеличению роли МЭМС-микрофонов в интернете вещей. МЭМС-микрофон состоит из МЭМС-элемента преобразования акустического давления, микросхемы предварительного усиления, платы с акустическим входным отверстием и крышки. МЭМС-элемент преобразования представляет собой переменный конденсатор с поликремневыми обкладками. Основными параметрами МЭМС-микрофонов являются: отношение сигнал шум, коэффициент нелинейных искажений, неравномерность амплитудно-частотной характеристики. При разработке МЭМС-микрофона применяется компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS. С помощью ANSYS Mechanical производится расчет и оптимизация конструкции для достижения необходимых параметров чувствительности МЭМС-элемента преобразования. С помощью электростатического анализа произведен расчет CV-характеристик с целью определения активной емкости и напряжения схлопывания мембран МЭМС-ЭП.С целью определения влияния параметров корпуса на характеристики МЭМС-микрофона произведен расчет влияния размеров корпуса, положения, размеров и количеств акустических отверстий, размеров над мембранного и под мембранного объемов на АЧХ микрофона. В НПК "Технологический центр" разработан и изготовлен экспериментальный образец первого отечественного МЭМС-микрофона. Активно проводятся работы по разработке новых конструкций и совершенствованию технических характеристик МЭМС-микрофонов.

Ключевые слова: МЭМС-микрофон, амплитудно-частотная характеристика, АЧХ, конечно-элементное моделирование, ANSYS, чувствительность, отношение сигнал шум, КНИ, напряжение схлопывания, резонансная частота

DOI: 10.31857/S0544126920010081

ВВЕДЕНИЕ

Список устройств, применяющих МЭМСмикрофоны, растет с каждым годом благодаря развитию информационных технологий и росту популярности мультимедийных сообщений и помощников. МЭМС-микрофоны применяются в автомобильной электронике, смартфонах и гарнитурах, умной домашней электронике и помощниках, планшетных ПК, телевизорах, умных часах, слуховых аппаратах. Благодаря миниатюрности и техническим характеристикам МЭМСмикрофонов увеличивается количество микрофонов в смартфонах и планшетных ПК. Так Apple iPhone X имеет уже четыре МЭМС-микрофона, что расширяет возможности записи и обработки звуковых сигналов [1].

Рынок МЭМС-микрофонов стабильно растет. Ожидается, что к 2024 году рынок достигнет 2898.8 млн долларов США. Прогнозируемый показатель совокупного среднегодового темпа роста в периоде с 2018 по 2024 год составляет 11.7%. Ожидается, что к 2024 году потребность в МЭМС-микрофонах вырастет до 13.3 млрд единиц в год [2].

В сравнении с электретными микрофонами, МЭМС-микрофоны имеют ряд преимуществ: высокую повторяемость параметров при производстве, слабую зависимость параметров от температуры, большое отношение сигнал шум, интегрируемость технологии изготовления с КМОПпроцессами.

Сокращения: Микросхемы ПУ – микросхемы предварительного усиления; ЧЭ – чувствительный элемент; АЧХ – амплитудно-частотные характеристики; С/Ш – отношение сигнал шум; КНИ – коэффициент нелинейных искажений; ЭП –элемент преобразования.



Рис. 1. Конструкция МЭМС-микрофона.



Рис. 2. Конструкция МЭМС-элемента преобразования.

КОНСТРУКЦИЯ МЭМС-МИКРОФОНА

МЭМС-микрофон состоит из МЭМС-элемента преобразования (ЭП), микросхемы предварительного усиления (микросхема ПУ), платы с акустическим входным отверстием и крышки (рис. 1). Пространство от акустического отверстия до подвижной мембраны называется надмембранным объемом; пространство за ЭП ограниченное корпусом микрофона называется подмембранным объемом [3].

Конструкция МЭМС-ЭП (рис. 2) представляет собой переменный конденсатор, одна из обкладок которого чувствительна к акустическому давлению (чувствительный элемент), вторая неподвижна и перфорирована (электрод). Чувствительный элемент это мембрана, выполненная из поликремния и закрепленная по периметру с помощью упругих подвесов. Электрод это жестко закрепленная по периметру толстая пластина с перфорацией, выполненная из поликремния. ЧЭ и электрод разделены воздушным зазором [4].

Основными параметрами МЭМС-микрофонов являются: отношение сигнал шум (С/Ш), коэффициент нелинейных искажений (КНИ), неравно-

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 49 № 1 2020

мерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Отношение сигнал шум это разница в децибелах между уровнем шума на выходе микрофона и стандартным опорным сигналом 1 кГц, 94 дБ (1 Па). Шум на выходе включает шум, вносимый как МЭМС-ЭП, так и микросхемой ПУ. Измерение шумового выхода микрофона происходит в тихой, безэховой среде с применением кривой взвешенной характеристики А, которая соответствует чувствительности человеческого уха к звуку на разных частотах [5]. Коэффициент нелинейных искажений это отношение среднеквадратичной суммы спектральных компонент выходного сигнала, отсутствующих в спектре входного сигнала, к среднеквадратичной сумме всех спектральных компонент входного сигнала. КНИ выражается в процентах [6].

МЭМС-микрофоны, представленные в большом количестве на рынке фирмами Knowles, TDK Inven Sense, Infineon Technologies, STMicroelectronics обладают С/Ш в диапазоне 59–66 дБ(А), КНИ при уровне акустического давления 94 дБ (1 Па) на частоте 1 кГц 0.2–0.4%, неравномерностью АЧХ 2.5–3 дБВ [7].



Рис. 3. Моделирование и оптимизация параметров ЧЭ.



Рис. 4. Моделирование остаточных напряжений в структуре: a - электрод деформированный под действием остаточных механических напряжений; $\delta - электрод$ с слоем Si₃N₄.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЭМС-МИКРОФОНА

При разработке МЭМС-микрофона применяется компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS. При помощи ANSYS Mechanical производится расчет и оптимизация конструкции ЧЭ. На рис. 3 представлен прогиб ЧЭ под действием давления 1 Па и зависимость прогиба ЧЭ от частоты внешнего воздействия. Оптимизация конструкции, размеров и количества упругих подвесов позволяет изменять чувствительность, резонансную частоту и форму деформации ЧЭ [8].

Одной из основных проблем изготовления МЭМС элементов преобразования являются остаточные механические напряжения [9]. На рис. 4*a* представлен расчет деформированной под действием сжимающих остаточных механических напряжений структура поликремневого



Рис. 5. CV-характеристика МЭМС-ЭП.

электрода. Деформированная структура приводит к неравномерному увеличению воздушного зазора между электродом и ЧЭ, уменьшению активной емкости и, соответственно, к уменьшению С/Ш. Одним из вариантов релаксации остаточных напряжений является компенсация при помощи тонкой диэлектрической пленки Si_3N_4 с противоположными растягивающими напряжениями. Моделирование уменьшение деформации в комбинированной структуре представлено на рис. 46. Деформация уменьшена с 3.4 до 0.18 мкм. Существуют и другие конструктивные способы релаксации напряжений: при помощи упругих подвесов и гофрирования структуры.

В работе [10] подробно представлены используемые способы расчета CV-характеристик МЭМС-ЭП. Конденсаторный МЭМС-микрофон требует постоянного напряжения смещения между ЧЭ и электродом. При подаче напряжения возникает притягивающая электростатическая сила, которая деформирует ЧЭ и смещает его в сторону электрода. При этом увеличивается емкость МЭМС-микрофона. При определенной величине напряжения смещения, которая называется напряжением притягивания (pull-in voltage), деформация ЧЭ становиться настолько большой, что мембрана спонтанно выходит из состояния равновесия и приходит в механический контакт с электродом. В таком режиме МЭМС-микрофон не работоспособен. Напряжение притягивания является важной характеристикой МЭМС-ЭП, так как оно определяет рабочее напряжение смещения. Получить значение напряжения притягивания можно из CV-характеристики, т.е. из зависимости емкости МЭМС-ЭП от напряжения смещения. Из-за сложной формы электрода и подвижной мембраны использование аналитических методов для расчета CV-характеристики не эффективно. В качестве альтернативы необходимо использовать конечно-элементное моделирование, одним из достоинств которого является возможность учета мельчайших деталей конструкции электродов МЭМС-микрофона. На рис. 5 представлены CV-характеристики МЭМС-ЭП для различных начальных зазоров.

Характеристики МЭМС-микрофона в отличие от интегральных микросхем сильно зависят от параметров корпуса. На АЧХ МЭМС-микрофона значительное влияет размеры корпуса, положение размеры и количество акустических отверстий, размеры надмембранного и подмембранного объемов, материал корпуса. С помощью ANSYS создана и рассчитана модель, включающая механическую модель МЭМС-ЭП и акустическую модель воздуха внутри корпуса. На рис. 6 представлены рассчитанные и измеренные АЧХ с различным количеством и положением акустических отверстий [11, 12].

Макет с акустическим отверстием в плате имеет ровную АЧХ, что говорит о том, что акустический резонанс надмембранного объема выше 10 кГц и не влияет на характеристику в рабочем диапазоне частот. Кроме того, большой подмембранный объем увеличивает чувствительность микрофона.

Макет с одним отверстием в крышке имеет четко выраженный резонанс на частоте 3.4 кГц и спад АЧХ на низких частотах, связанный с тем, что при



Рис. 6. Результаты конечно-элементного моделирования и измерения АЧХ макета МЭМС-микрофона.



Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика макета МЭМС-микрофона.

уменьшении подмембранного объема увеличивается сопротивление, которое он оказывает движению мембраны, то есть, снижается чувствительность МЭМС-ЭП. Подъем АЧХ из-за резонанса частично компенсирует падение чувствительности в области низких и средних частот.

МАКЕТ КОНДЕНСАТОРНОГО МЭМС-МИКРОФОНА

В НПК "Технологический центр" разработан и изготовлен макет первого отечественного МЭМС-

микрофона. Макет имеет ровную АЧХ с неравномерностью 2–3 дБВ в диапазоне частот от 100 Гц до 10 кГц. Достигнутые значения С/Ш составляют 65 дБ(А), коэффициент нелинейных искажений (КНИ) 0.2% при уровне акустического давления 94 дБ на частоте 1 кГц. На рис. 7 представлена АЧХ макета и общий вид.

Однако в настоящее время на мировом рынке наблюдается тенденция в увеличении С/Ш конденсаторных МЭМС микрофонов до уровня 78 дБ(А) [13]. Улучшение данного параметра стало возможным благодаря новой конструкции с встреч-

№ 1

2020

но-штыревой структурой ЭП (рис. 1), которая позволила не только увеличить активную ем-кость, но и уменьшить шум, связанный с прохождением звука через отверстия перфорированного электрода [14, 15].

В НПК "Технологический центр" активно проводятся работы по разработке новых конструкций и совершенствованию технических характеристик МЭМС-микрофонов. Для увеличения емкости МЭМС-ЭП ведется проработка конструкции с встречно-штыревой структурой элемента преобразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный в НПК "Технологический центр" макет МЭМС-микрофона обладает характеристиками на уровне зарубежных аналогов, что показывает возможность создания конкурентоспособного изделия на отечественном рынке для использования в современных устройствах мобильной и портативной электроники.

При разработке МЭМС-микрофона применялось компьютерное моделирование в программном комплексе ANSYS. Производились оптимизация чувствительности и резонансной частоты ЧЭ, расчет CV-характеристики МЭМС-ЭП, акустический расчет корпуса МЭМС-микрофона.

В связи с ростом рынка высокочувствительных МЭМС-микрофонов проводится работа по увеличению С/Ш с помощью: снижения шума МЭМС-ЭП, снижения шума микросхемы ПУ, увеличение отношения активной емкости к паразитной емкости МЭМС-ЭП [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Apple iPhone X MEMS Microphones Complete Teardown Report 2018 [Электронный ресурс]. URL:https://www.businesswire.com/news/home/ 20180725005343/en/(дата обращения 03.04.2019)
- MEMS Microphone Market Outlook to 2024 [Электронный ресурс]. URL:https://www.businesswire.com/ news/home/20180702005421/en/MEMS-Microphone-Market-Outlook-2024-Global-2.9 (дата обращения 03.04.2019)
- 3. Годовицын И.В., Генералов С.С., Поломошнов С.А., Сывороткин П.А., Амеличев В.В. Интегральный конденсаторный преобразователь акустического давления для миниатюрного МЭМС-микрофона // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 4. С. 43–50.

- 4. Амеличев В.В., Ильков А.В. Конструктивно-технологический базис создания электроакустических преобразователей. М.: Техносфера, 2012. 104 с.
- ГОСТ Р 53576-2009. Микрофоны. Методы измерения электроакустических параметров. М.: Стандартинформ, 2010. 46 с.
- J. Lewis, "Microphone specifications explained," Invensense Inc., San Jose, CA, USA, Application Note AN-1112, 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://www.invensense.com/wp-content/uploads/ 2015/02/AN-1112-v1.1.pdf (дата обращения 03.04.2019).
- STMicroelectronics Total Parts for MEMS Microphones [Электронный ресурс]. URL: https://www.st.com/content/st_com/en/product-selec-tor2.html (дата обращения 03.04.2019)
- 8. *Lee H.H.* Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. SDC publications, 2018. 612 p.
- 9. Амеличев В.В., Григорьев, Д.М., Резнев А.А. Конечно-элементное моделирование мембранного модуля // Известия высших учебных заведений Электроника. 2018. Т. 23. № 3. С. 277–284.
- Григорьев Д.М., Годовицын И.В., Амеличев В.В., Генералов С.С., Поломошнов С.А. Использование конечно-элементного моделирования для расчета СV-характеристики конденсаторного МЭМС-микрофона // Микроэлектроника. 2017. №. 6. С. 431–439.
- Григорьев Д.М., Годовицын И.В., Амеличев В.В., Генералов С.С. Расчет АЧХ МЭМС-микрофона с помощью конечно-элементного моделирования // Микроэлектроника. 2018. Т. 47. № 3. С. 238–243.
- 12. Григорьев Д.М., Годовицын И.В., Амеличев В.В., Ильков А.В. Исследование влияния параметров акустического отверстия на амплитудно-частотную характеристику МЭМС-микрофона//Нано- и Микросистемная техника. 2018. Т. 20. №. 8. С. 491–497.
- TDK InvenSense MEMS Microphones (Microphone) [Электронныйресурс]. URL: https://product.tdk.com/ en/search/sw_piezo/mic/mems-mic/list#pn=*&psts%5 B%5D=0&psts%5B%5D=-20&psts%5B%5D=-10& 8snr_nom=72&_l=20&_p=1&_c=part_no-part_no&_ d=0 0 (дата обращения 03.04.2019)
- 14. Anzinger S., Manz J., Dehe A., Schrag G. A Comb-Based Capacitive MEMS Microphone with High Signal-to-Noise Ratio: Modeling and Noise-Level Analysis // Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings. 2017. V. 1. № 4. P. 1–5.
- Dehe A. MEMS microphone innovations towards high signal to noise ratios (Plenary Presentation) // Smart Sensors, Actuators, and MEMS VIII. – International Society for Optics and Photonics, 2017
- Dehé A., Wurzer M., Füldner M., Krumbein U. The infineon silicon MEMS microphone // AMA conferences. 2013. P. 95–99.