

11, ноябрь 2015

УДК 53.087

Сегментация подвижного электрода ёмкостного микродатчика давления с целью повышения его чувствительности

***Рожков Н.В.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»*

*Научный руководитель: Холевин В.В., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технология приборостроения»*

k_rl6@bmstu.ru

1. Введение

Ёмкостные микродатчики давления широко используются в настоящее время в различных областях науки и техники для контроля давления в жидкостных и газовых средах. Основным требованием, предъявляемым к таким микродатчикам, является как можно более высокая чувствительность измерений, которая довольно сильно влияет на точность результатов измерений. Чувствительность ёмкостных микродатчиков можно повысить с помощью внесения изменений в типовую конструкцию датчика, а также подбором его оптимальных геометрических параметров. В настоящей работе в качестве способа повышения чувствительности микродатчика давления рассматривается способ сегментации подвижного электрода, который заключается в том, что подвижный металлический электрод разбивается на отдельные кольцевые сегменты.

2. Переход от классической конструкции микродатчика к конструкции с сегментированным подвижным электродом

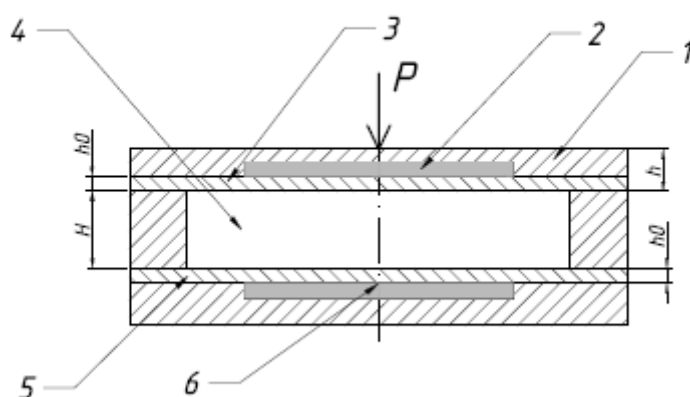


Рис. 1. Классическая конструкция микродатчика давления

На рис. 1 представлена конструкция типового емкостного микродатчика давления [2]. Чувствительным элементом этого микродатчика является круглая мембрана 1 толщиной h (обычно 1,5-3 мкм), изготовленная из нитрида кремния SiN . Внутри мембраны 1 расположен подвижный алюминиевый электрод 2 радиусом R (50-100 мкм). Под мембраной находится вакуумная полость 4 высотой H . Под полостью располагается неподвижный алюминиевый электрод 6. Оба электрода изолированы слоями 3 и 5 из нитрида кремния толщиной h_0 .

При приложении внешнего давления p к мембране происходит её деформация, в результате чего изменяется расстояние между подвижным и неподвижным электродами. Изменение расстояния между электродами приводит к изменению электрической ёмкости между ними. С помощью электронной схемы происходит пересчёт изменения ёмкости в единицы давления. Полученный таким образом результат пересчёта ёмкости в давление является численным значением давления, которое было приложено к мембране.

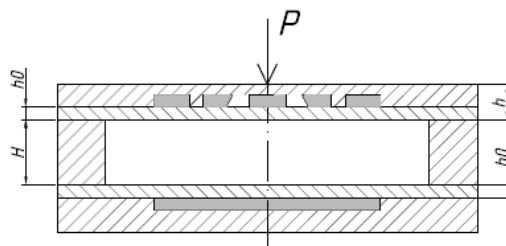


Рис. 2. Конструкция микродатчика давления с сегментированным электродом

На рис. 2 представлена конструкция микродатчика давления с теми же геометрическими размерами, что и у микродатчика на рис. 1. Основное отличие этих двух микродатчиков состоит в различной конструкции подвижного электрода. В классической конструкции микродатчика используется сплошной круглый алюминиевый электрод толщиной, как правило, около 200 нм. В новом варианте конструкции микродатчика подвижный алюминиевый электрод разделяется на несколько кольцевых сегментов различной ширины.

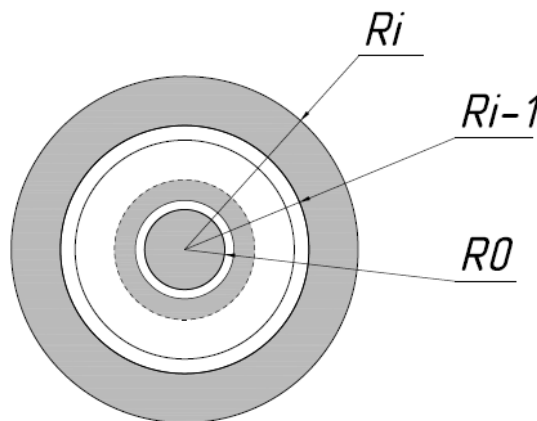


Рис. 3. Топология сегментированного электрода

Топология сегментированного электрода, состоящего из N сегментов, представлена на рис. 3. Из рисунка 3 видно, что каждый из $N - 1$ кольцевых электродов образован двумя окружностями радиусами R_i и R_{i-1} . Центральный электрод представляет собой окружность радиусом R_0 . Сегменты отделены друг от друга слоем диэлектрика, при этом этот зазор составляет около 5 мкм.

3. Методика расчёта чувствительности микродатчика давления с сегментированным электродом

Для того, чтобы рассчитать ёмкость микродатчика давления, конструкция которого изображена на рис. 2, необходимо составить на основе его конструкции эквивалентную электрическую схему. В общем ёмкостной микродатчик представляет собой сложный конденсатор с двумя металлическими обкладками. Внутри этого конденсатора чередуются диэлектрические слои воздуха и нитрида кремния.

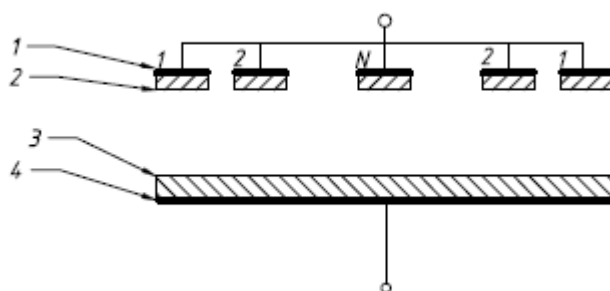


Рис. 4. Представление микродатчика давления в виде конденсатора

Из рис. 4 видно, что верхняя обкладка 1 этого конденсатора разбита N кольцевых сегментов и представляет собой подвижный электрод микродатчика давления. Сегменты подвижного электрода пронумерованы на рисунке. Под обкладкой 1 находится тонкий слой диэлектрика (слой нитрида кремния) 2, который служит изоляцией подвижного электрода от неподвижного. Нижняя обкладка 4 представляет собой неподвижный сплошной электрод микродатчика давления. Сверху обкладка 4 покрыта тонким слоем изоляции 3 из нитрида кремния. Пространство между диэлектрическими слоями 2 и 3 заполнено воздухом и представляет собой полость микродатчика давления.

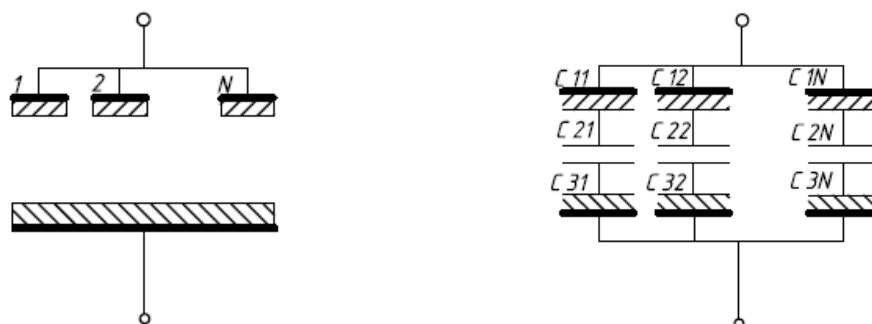


Рис. 5. Упрощённая конструкция конденсатора и его эквивалентная схема

На рис. 5 показан упрощенный вариант рассмотренного выше конденсатора без учёта формы верхней обкладки. На основе этой конструкции этого конденсатора была построена его эквивалентная схема, изображённая на рис. 5 с правой стороны. Данная схема состоит из N параллельных ветвей (по числу сегментов подвижного электрода). Каждая ветвь состоит из трёх последовательно соединённых конденсаторов.

Для расчёта ёмкости C_N микродатчика давления необходимо вычислить ёмкость каждого из конденсаторов, составляющих данную эквивалентную схему. Обе обкладки этих конденсаторов C_{11} - C_{1N} изогнуты под действием внешнего давления. Они имеют форму кольца внешним радиусом R_{i+1} и внутренним радиусом R_i . Пространство между обкладками заполнено слоем нитрида кремния толщиной h_0 . Ёмкость одного из этих конденсаторов может быть вычислена по формуле ёмкости плоского конденсатора следующим образом:

$$C_{1i} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon (R_{i+1}^2 - R_i^2)}{h_0}, (1)$$

где ε -диэлектрическая проницаемость нитрида кремния;

ε_0 -электрическая постоянная;

$\pi(R_{i+1}^2 - R_i^2)$ –площадь кольцевой обкладки радиусами R_{i+1} и R_i ;

h_0 – расстояние между обкладками, равное толщине изоляционного слоя.

Конденсаторы C_{31} - C_{3N} конструктивно похожи на конденсаторы C_{11} - C_{1N} . Обкладки этих конденсаторов не изогнуты и зазор между ними постоянен и равен толщине изоляционного слоя h_0 . Ёмкость этих конденсаторов может быть рассчитана по той же формуле (1), что и для конденсаторов C_{11} - C_{1N} .

При приложении давления к мембране верхние обкладки конденсаторов C_{21} - C_{2N} изгибаются вместе ней по некоторой кривой линии. Между обкладками находится вакуум. При расчёте ёмкости такого конденсатора необходимо учитывать, что расстояние между обкладками в каждой точке разное, и зависит от прогиба мембраны в каждой конкретной точке.

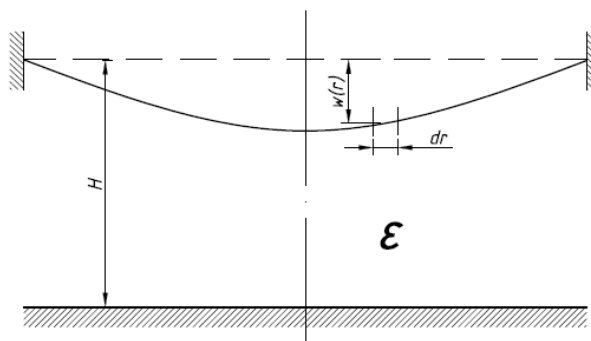


Рис 6. Расчётная схема ёмкости конденсатора с изогнутой обкладкой

На рис. 6 представлена схема поясняющая расчёт таких конденсаторов. Для того, чтобы вычислить ёмкость такого конденсатора необходимо знать прогибы каждой точки мембраны. Уравнение для прогибов каждой точки обкладки при приложении к ней внешнего давления, которое распределено равномерно по площади мембраны, имеет вид [3]:

$$w(r) = \frac{p}{64D} (R^2 - r^2)^2, (2)$$

где p -внешнее давление;

R -радиус обкладки;

r -координата, отсчитываемая от центра обкладки;

D -цилиндрическая жёсткость обкладки, вычисляемая по формуле $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$

(E -модуль Юнга нитрида кремния, из которого изготовлена мембрана, h -толщина мембраны, ν -коэффициент Пуассона для нитрида кремния).

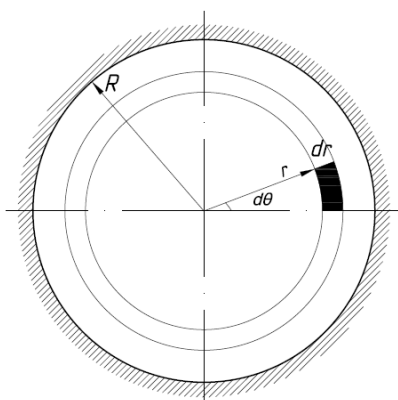


Рис 7. Верхняя обкладка конденсатора

На рис. 7 показана верхняя обкладка конденсатора, на которой выделен малый элемент dr . Площадь этого малого элемента равна $rdrd\theta$. Ёмкость конденсатора, обкладки которого состоят из малых элементов dr , можно вычислить по формуле ёмкости плоского конденсатора (3) [3]:

$$dC = \frac{\varepsilon_0 r dr d\theta}{H - w(r)}, \quad (3)$$

где $d\theta$ -малый угол на верхней обкладке;

H -глубина полости;

$H - w(r)$ -зазор между обкладками в точке с координатой r

Ёмкость всего конденсатора можно получить интегрированием выражения (3) по координате r и углу θ :

$$C_{2i} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\varepsilon_0 \varepsilon r dr d\theta}{H - w(r)} = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon \int_0^R \frac{r dr}{H - w(r)}. \quad (4)$$

Глубина вакуумной полости H равняется наибольшему прогибу мембраны, т.е. прогибу при наибольшем приложенном давлении p_{max} , на которое рассчитан микродатчик:

$$H = \frac{p_{max} R^4}{64D}. \quad (5)$$

После подстановки выражений (3) и (5) в формулу (4) и численного интегрирования получается зависимость ёмкости конденсатора от внешнего давления $C_{2i}(p)$.

Формула (4) справедлива для расчёта ёмкости конденсатора с круглыми обкладками. Для того, чтобы рассчитать ёмкость конденсатора с кольцевыми обкладками необходимо поменять пределы интегрирования на внешний R_{i+1} и внутренний радиус кольца R_i .

После расчёта ёмкостей конденсаторов, входящих в эквивалентную схему на рис. 5, по формулам (1) и (4) можно вычислить ёмкость C_N всего микродатчика, электрод которого состоит из N кольцевых сегментов. Для этого используются свойства последовательного и параллельного соединения конденсаторов. В итоге получается следующая формула расчёта ёмкости такой системы в зависимости от количества сегментов N , из которого состоит подвижный электрод:

$$C_N = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^3 (C_{ji})^{-1} \right)^{-1}. \quad (6)$$

После вычисления ёмкости необходимо вычислить чувствительность S_N микродатчика давления с сегментированным электродом, используя следующее соотношение [3]:

$$S_N = \frac{dC_N}{dp}. \quad (7)$$

4. Результаты расчётов ёмкости и чувствительности микродатчиков давления с сегментированным электродом

Ниже приведены исходные геометрические параметры рассчитываемого микродатчика давления и параметры материалов из которого он изготовлен:

- Материал мембраны и изоляции: нитрид кремния SiN ($E = 290$ ГПа, $\nu = 0,23, \varepsilon = 6$);
- Толщина мембраны $h = 1,6$ мкм;
- Толщина изоляции $h_0 = 0,2$ мкм;
- Радиус электрода $R = 55$ мкм;
- Радиусы сегментов для $N = 1$: 55 мкм;
- Радиусы сегментов для $N = 2$: 55 мкм, 30 мкм, 25 мкм
- Радиусы сегментов для $N = 3$: 55 мкм, 45 мкм, 40 мкм, 30 мкм, 25 мкм (см. рис. 8);
- Диапазон давлений $p = 0 - 3$ кПа;

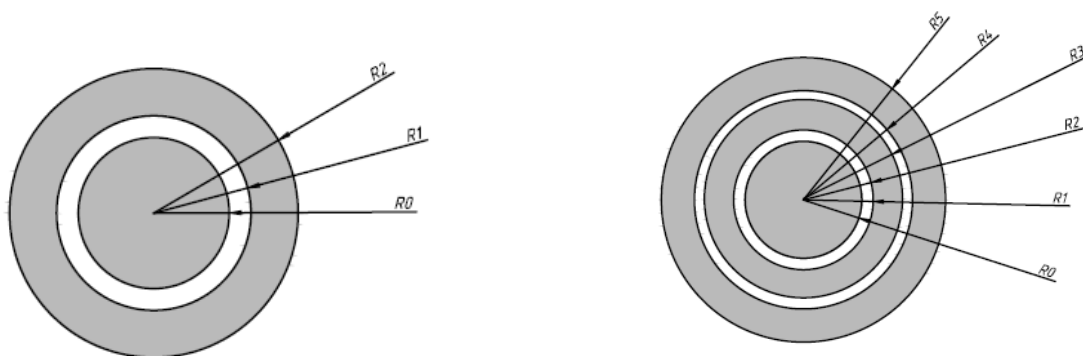


Рис 8. Вид верхнего электрода с указанием радиусов кольцевых сегментов

На основе приведённых выше данных с использованием зависимостей, приведённых в предыдущем разделе, в системе *MATLAB* было исследовано влияние числа сегментов на ёмкость и чувствительность микродатчика. Были построены зависимости $C(p)$ и $S(p)$ (см. рис. 9-10) при различных значениях числа сегментов N подвижного электрода.

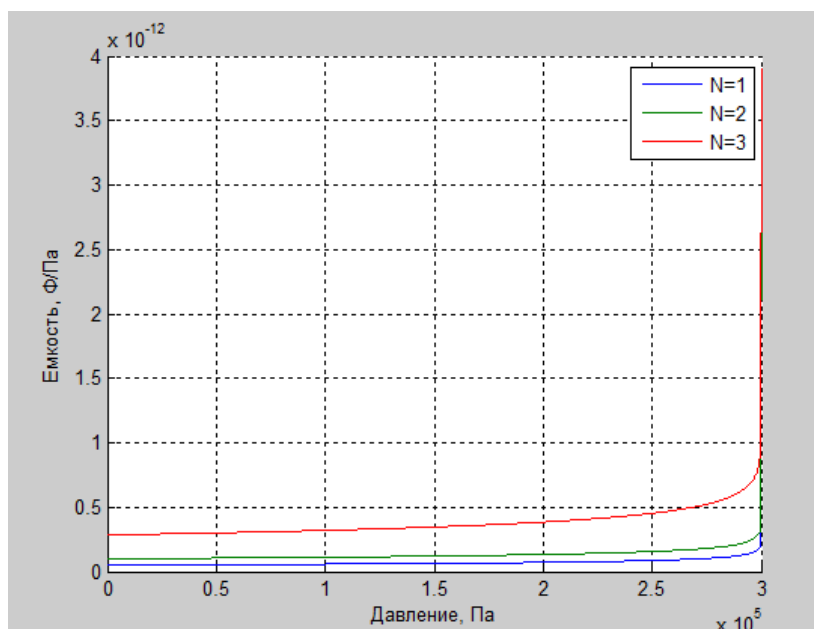


Рис. 9. Зависимость емкости от давления для различных значений числа сегментов подвижного электрода

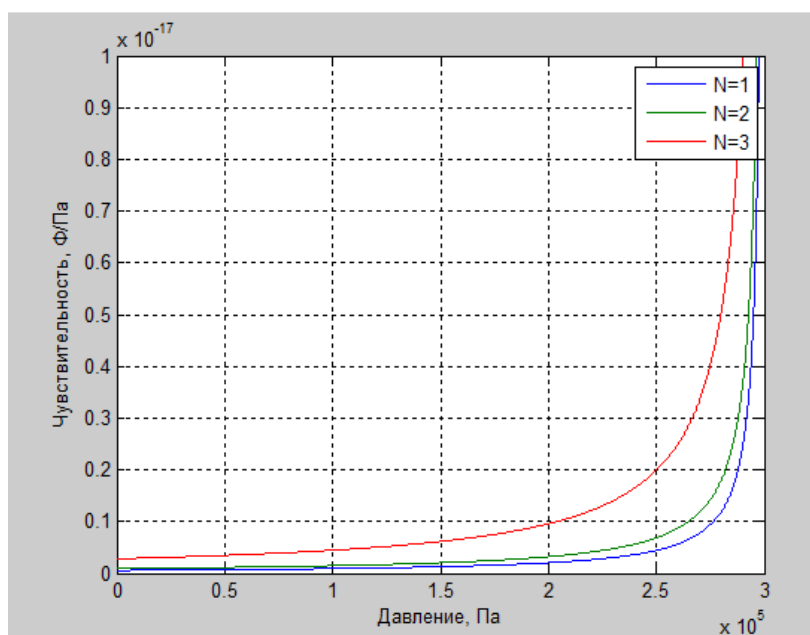


Рис. 10. Зависимость чувствительности от давления для различных значений числа сегментов подвижного электрода

Из рис. 9 видно, что при $N = 2$ ёмкость повышается в среднем в 1,6 раза. Значительный рост ёмкости наблюдается при увеличении числа сегментов до $N = 3$. При этом при числе сегментов $N = 3$ ёмкость возрастает в среднем в 5 раз.

Из рис. 10 можно увидеть, что чувствительность микродатчика давления увеличивается с ростом числа N сегментов. При $N = 2$ чувствительность возрастает в среднем в 1,5 раза, а при $N = 3$ она увеличивается примерно в 4,5 раза.

5. Заключение

В результате расчётов установлено, что при разбиении подвижного электрода на кольцевые сегменты, чувствительность емкостного микродатчика увеличивается. Расчёты проводились при неизменных геометрических параметрах датчика (толщина мембраны, толщины диэлектрических слоёв, радиус внешнего электрода, радиус центрального электрода). Изменялось только число сегментов и радиусы ограничивающих их окружностей. Чем больше было число сегментов, чем меньше становилась их ширина, и тем больше становилась чувствительность. Например, в микродатчике с электродом из двух сегментов чувствительность возросла в 1,6 раз по сравнению с микродатчиком, имеющим один сегмент, при увеличении числа сегментов до трёх произошёл рост чувствительности уже в 4,5 раза.

Список литературы

1. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. Сер. Мир электроники: пер. с англ. М.: Техносфера, 2004. 528 с.
2. Willem Frederik Adrianus Besling. MEMS Capacitive Pressure Sensor, Operating Method And Manufacturing Method. US Patent US 2013/0118265 A1, 16.05.2013.
3. Eswaran P. and Malarvizhi S. Design Analysis of MEMS Capacitive Differential Pressure Sensor for Aircraft Altimeter // International Journal of Applied Physics and Mathematics. 2012. Vol. 2, No. 1. P. 14-20.