

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

УДК 621.3.032

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-9

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ВИДЕ КРУГЛОЙ МЕМБРАНЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЛИНЕЙНОСТИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

Е. А. Рыблова<sup>1</sup>, В. С. Волков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> Elizaveta.ryblova@mail.ru, <sup>2</sup> vadimv\_1978@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Целью исследования является разработка полупроводникового чувствительного элемента для датчика давления на основе тензорезистивного эффекта в виде профилированной мембраны с повышенной чувствительностью и сниженной погрешностью линейности выходного сигнала. *Материалы и методы.* Проведено имитационное моделирование чувствительного элемента в виде профилированной мембраны в программном пакете COMSOL Multyphysics для определения геометрических параметров сечения кремниевой мембраны, обеспечивающих оптимальное соотношение чувствительности и погрешности линейности выходного сигнала. *Результаты.* Создана имитационная модель полупроводникового чувствительного элемента датчика давления, позволяющая повысить чувствительность и снизить погрешность линейности выходного сигнала. *Выводы.* Таким образом, на основе проведенного моделирования были определены оптимальные геометрические параметры сечения профилированной мембраны полупроводникового тензопреобразователя давления мембранного типа.

**Ключевые слова:** полупроводниковый чувствительный элемент, кремниевая мембрана, повышение чувствительности, погрешность линейности

**Для цитирования:** Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров полупроводникового чувствительного элемента в виде круглой мембраны с целью повышения чувствительности и снижения погрешности линейности выходного сигнала // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 73–79. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-9

## OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A SEMICONDUCTOR SENSING ELEMENT IN THE FORM OF A ROUND MEMBRANE IN ORDER TO INCREASE THE SENSITIVITY AND REDUCE THE LINEARITY ERROR OF THE OUTPUT SIGNAL

E.A. Ryblova<sup>1</sup>, V.S. Volkov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> Elizaveta.ryblova@mail.ru, <sup>2</sup> vadimv\_1978@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The aim of the study is to develop a semiconductor sensing element for a pressure sensor based on a strain-resistive effect in the form of a profiled membrane with increased sensitivity and reduced linearity error of the output signal. *Materials and methods.* The simulation of a sensor element in the form of a profiled membrane in the COMSOL Multiphysics software package was carried out to determine the geometric parameters of the silicon membrane cross-section, providing an optimal ratio of sensitivity and linearity error of the output signal. *Results.* A simulation model of a semiconductor pressure sensor sensor element has been created, which allows to increase the sensitivity

ty and reduce the linearity error of the output signal. *Conclusions.* Thus, on the basis of the conducted modeling, the optimal geometric parameters of the cross-section of the profiled membrane of a semiconductor pressure strain converter of the membrane type were determined.

**Keywords:** semiconductor sensing element, silicon membrane, increased sensitivity, linearity error

**For citation:** Ryblova E.A., Volkov V.S. Optimization of the parameters of a semiconductor sensing element in the form of a round membrane in order to increase the sensitivity and reduce the linearity error of the output signal. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):73–79. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-9

### Введение

В настоящее время широкое распространение получили полупроводниковые тензодатчики давления мембранного типа. В основном в таких датчиках применяются плоские мембраны или мембраны с жестким центром. Одними из основных требований к современным полупроводниковым тензодатчикам давления являются повышение чувствительности и снижение погрешности выходного сигнала.

Повышение чувствительности полупроводникового тензодатчика с плоской мембраной обеспечивается уменьшением толщины мембраны, однако уменьшать толщину плоской мембраны можно только до определенных пределов, обусловленных технологией изготовления, кроме того, уменьшение толщины мембраны приводит к дополнительной погрешности линейности выходного сигнала полупроводникового тензодатчика давления.

Некоторое увеличение выходного сигнала и линейности функции преобразования обеспечивают мембраны с жестким центром, однако такие элементы чувствительны к воздействию ударов и вибраций, при воздействии которых жесткий центр ведет себя подобно инерционной массе, что приводит к дополнительной погрешности выходного сигнала.

### Материалы и методы

Анализ современной литературы показал, что в настоящее время зарубежными учеными исследуются полупроводниковые чувствительные элементы (ЧЭ) в виде мембран переменной толщины, профиль которых имеет широкие участки в области жесткой заделки и более тонкий участок в центре [1]. В статье [2] описано исследование профилированной мембраны, позволяющей повысить чувствительность полупроводникового тензодатчика давления. На рис. 1 представлен эскиз профилированной мембраны, соотношение толщины широкого и узкого участков составляет 3 к 1, а переход от узкого участка к широкому расположен на расстоянии 0,95 мм от центра мембраны, моделирование которой описано в статье [2]. В результате моделирования были получены следующие параметры ЧЭ: чувствительность составила 1505,85, а погрешность линейности – 3,33 %.

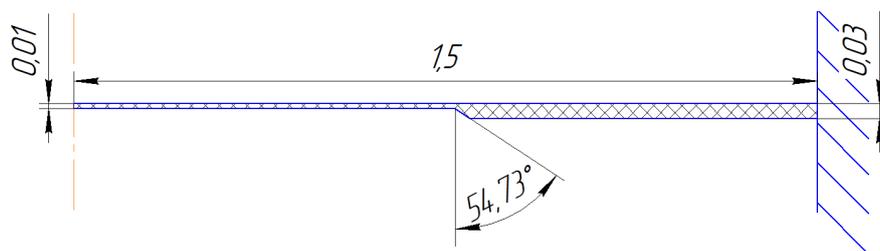


Рис. 1. Эскиз профилированной мембраны

Дальнейшее исследование конструкции профилированной мембраны направлено на снижение погрешности линейности. Для определения минимальной погрешности линейности профилированной мембраны с координатой ступеньки на расстоянии 0,95 мм от центра изменялась толщина широкого участка мембраны от 30 до 40 мкм, с интервалом 1 мкм, при этом толщина узкого участка оставалась 10 мкм, таким образом, отношение ширины участков менялось от 3 к 1 до 4 к 1.

Для каждого случая был построен график зависимости разности радиального и тангенциального напряжений от приложенного давления и рассчитаны погрешность линейности и чувствительность, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Отношение широкого и узкого участков	Погрешность линейности, %	Чувствительность
3 к 1	3,33	1505,85
3,1 к 1	3,03	1430,7
3,2 к 1	2,78	1370,4
3,3 к 1	2,56	1311,6
3,4 к 1	2,39	1260,1
3,5 к 1	2,54	1198,9
3,6 к 1	1,62	1153,3
3,7 к 1	1,53	1105,6
3,8 к 1	1,54	1053,6
3,9 к 1	1,55	1012,8
4 к 1	1,83	972,8

Исходя из полученных данных, представленных в табл. 1, видно, что мембраны с соотношениями 3,6 к 1, 3,7 к 1, 3,8 к 1 и 3,9 к 1 имеют низкую погрешность линейности выходного сигнала, однако в случае с мембраной с соотношением 3,6 к 1 чувствительность не уступает плоской мембране равной 1129,9.

На рис. 2 представлен график зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления для профилированной мембраны с соотношением широкого и узкого участков 3,6 к 1 и координатой ступеньки на расстоянии 0,95 мм от центра.

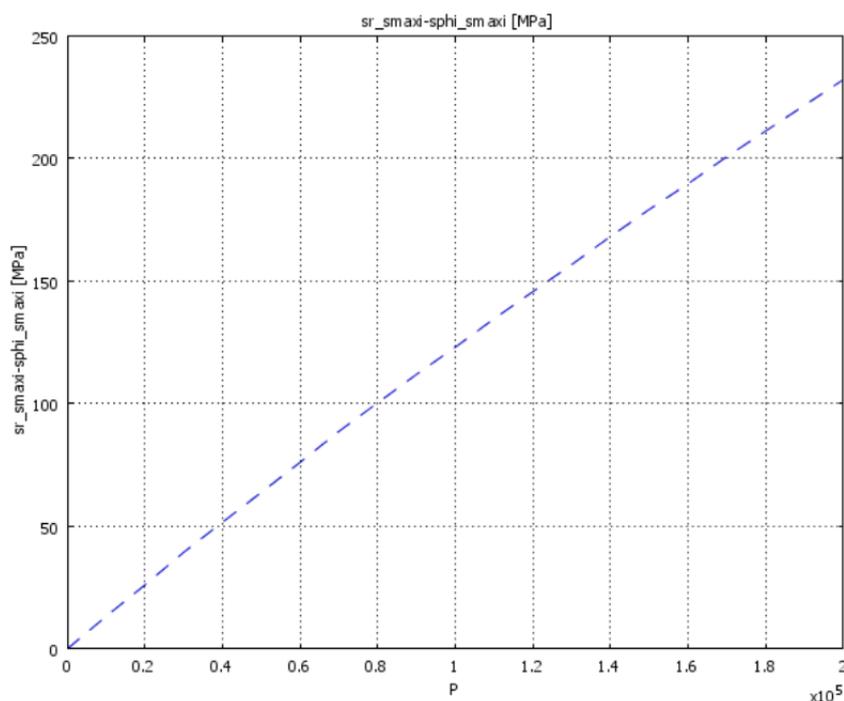


Рис. 2. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления при отношении 3,6 к 1

Из результатов проведенного моделирования и расчетов погрешности линейности видно, что наименьшая погрешность линейности соответствует мембране с отношением толщины широкого и узкого участков 3,6 к 1, она составляет 1,62 %, при этом чувствительность снизилась по сравнению с мембраной с соотношением широкого и узкого участков 3 к 1 приблизительно на 23 %.

Было проведено сравнение профилированной мембраны диаметром 1,5 мм, с соотношением участков 3,6 к 1 с плоской мембраной толщиной 0,03 мм и плоской мембраной толщиной 0,036 мм. В одной системе координат были построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения для плоской мембраны и профилированной мембраны.

На рис. 3 представлены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжений для плоской мембраны толщиной 0,03 мм (сплошная линия) и профилированной мембраны (пунктирная линия).

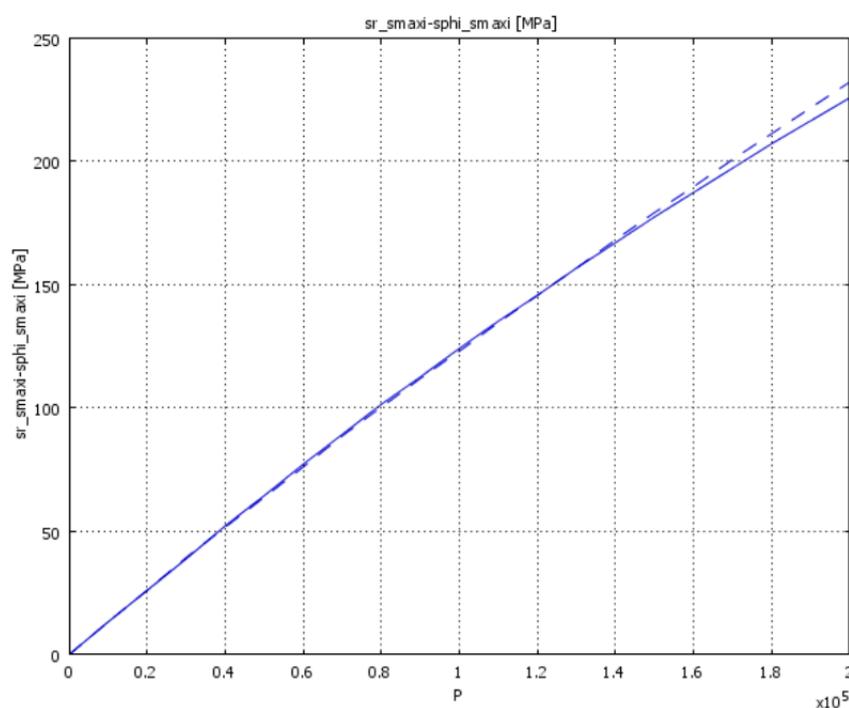


Рис. 3. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжений от приложенного давления для плоской и профилированной мембран

На рис. 4 представлены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжений для плоской мембраны толщиной 0,036 мм (сплошная линия) и профилированной мембраны (пунктирная линия).

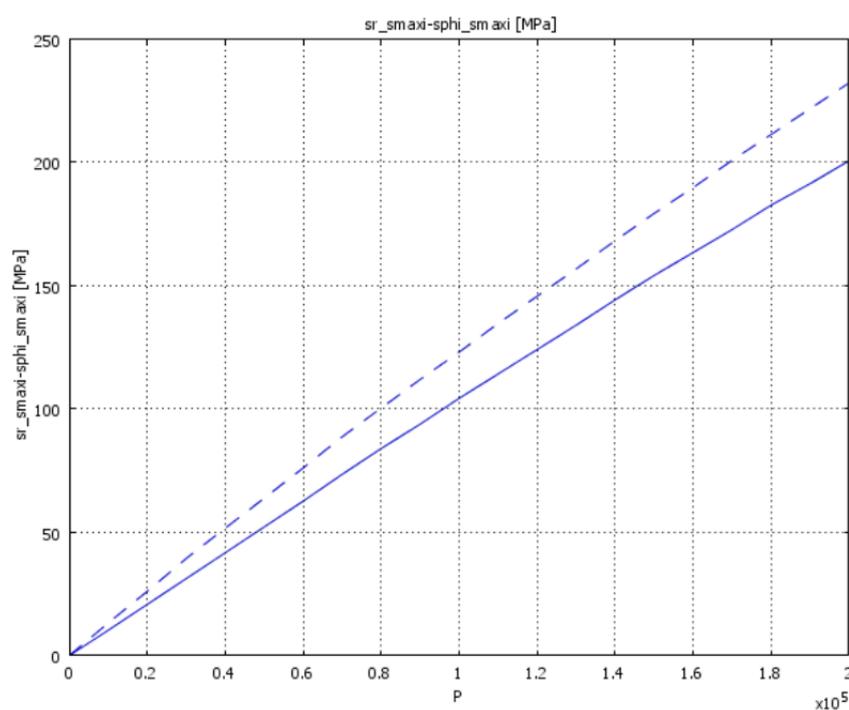


Рис. 4. Зависимость разности радиального и тангенциального напряжений от приложенного давления для плоской и профилированной мембран

Для каждого случая была рассчитана чувствительность и погрешность линейности, данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип мембраны	Погрешность линейности	Чувствительность
Плоская (толщина 0,03мм)	2,88 %	1118,6
Плоская (толщина 0,036мм)	1,31 %	1001,9
Профилированная	1,62 %	1153,3

Из табл. 2 видно, что значение чувствительности профилированной мембраны с соотношением участков 3,6 к 1 значительно снизилось в сравнении с мембраной с соотношением участков 3 к 1. Для определения, при каких геометрических параметрах профилированная мембрана с соотношением широкого и узкого участков 3,6 к 1 обладает наилучшей чувствительностью, было проведено моделирование профилированной мембраны с изменением координаты ступеньки от 0,7 мм до 1 мм от центра мембраны с шагом 0,05.

Для каждого значения координаты ступеньки были построены графики зависимости разности радиального и тангенциального напряжения от приложенного давления 0,2 МПа.

На основании полученных данных была составлена табл. 3

Таблица 3

Координата ступеньки	Максимальное напряжение, МПа	Погрешность линейности
1	229,42	2,44
0,95	231,91	1,62
0,9	231,97	1,84
0,85	234,12	1,46
0,8	233,01	2,57
0,75	233,35	2,73
0,7	230,61	2,82

Из табл. 3 видно, что наименьшая чувствительность соответствует мембране с соотношением широкого и узкого участков 3,6 к 1, при этом максимальное напряжение, а следовательно, и чувствительность такой мембраны выше в сравнении с мембранами, имеющими другие соотношения широкого и узкого участков.

На основе полученных данных (табл. 3) была построена зависимость погрешности линейности от координаты ступеньки, результаты представлены в виде графика (рис. 5).

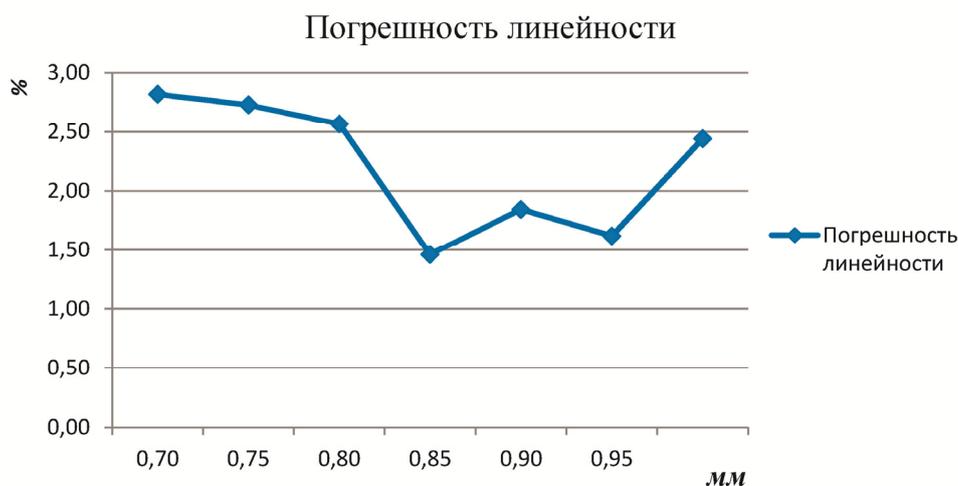


Рис. 5. Зависимость погрешности линейности профилированной мембраны от координаты ступеньки

Для сравнения мембраны профилированной с соотношением участков 3,6 к 1 и координатой ступеньки на расстоянии 0,85 мм от центра мембраны с плоской мембраной толщиной 0,03 мм и плоской мембраной 0,036 мм данные сведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип мембраны	Погрешность линейности	Чувствительность
Плоская (толщина 0,03мм)	2,88 %	1118,6
Плоская (толщина 0,036мм)	1,31 %	1001,9
Профилированная	1,46 %	1170,1

Из табл. 4 видно, что наибольшая чувствительность соответствует профилированной мембране, при этом погрешность линейности выходного сигнала составляет порядка 1,5 %, что является хорошим показателем для полупроводникового чувствительного элемента.

### Результаты и обсуждения

Минимальная погрешность линейности, порядка 1,5 %, была получена при отношении ширины участков 3,6 к 1, при данном значении максимальная чувствительность соответствует координате 0,85 мм от центра мембраны. Численное значение чувствительности профилированной мембраны с такими геометрическими параметрами составляет 1170,1, что немного больше чувствительности плоской мембраны. На рис. 6 представлен эскиз сечения профилированной мембраны с параметрами, описанными выше [3].

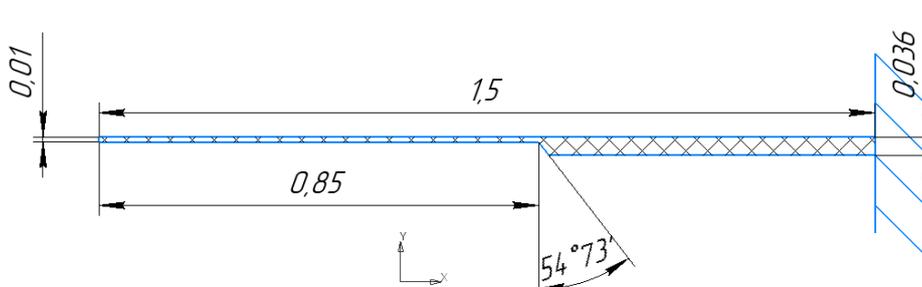


Рис. 6. Эскиз профилированной мембраны с оптимальным соотношением параметров чувствительности и погрешности линейности

### Заключение

Таким образом, проведенное исследование характеристик профилированной мембраны показывает, что наилучший результат по соотношению чувствительности и линейности получен при значении 0,85 координаты ступеньки и отношении широкого и узкого участков 3,6 к 1. Чувствительность такой профилированной мембраны составила 1170,1, что на 15 % превышает чувствительность плоской мембраны, в то время как погрешность линейности составляет 1,46 %.

### Список литературы

1. Shyam Aravamudhan. Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography. University of South Florida Scholar Commons, 2006.
2. Рыблова Е. А., Волков В. С. Оптимизация параметров полупроводникового чувствительного элемента в виде круглой мембраны с целью повышения чувствительности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 39–46. doi:10.21685/2307-5538-2021-2-5
3. Патент RU 2 732 839 C1 Полупроводниковый преобразователь давления с повышенной точностью и чувствительностью / Волков В. С., Рыблова Е. А. ; № 2019121377 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 23.09.2020.

### References

1. Shyam Aravamudhan. *Development of micro/nanosensor elements and packaging techniques for oceanography*. University of South Florida Scholar Commons, 2006.
2. Ryblova E.A., Volkov V.S. Optimization of parameters of a semiconductor sensing element in the form of a round membrane in order to increase sensitivity. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(2):39–46. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-2-5
3. Patent RU 2 732 839 C1 Semiconductor pressure converter with increased accuracy and sensitivity. Volkov V.S., Ryblova E.A.; No. 2019121377; appl. 09.07.2019; publ. 23.09.2020. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors*

**Елизавета Анатольевна Рыблова**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: Elizaveta.ryblova@mail.ru

**Elizaveta A. Ryblova**

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia )

**Вадим Сергеевич Волков**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры приборостроения,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: vadimv\_1978@mail.ru

**Vadim S. Volkov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of instrument engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia )

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 17.06.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021**

**Принята к публикации/Accepted 29.09.2021**