

С. А. АДАРЧИН, А. С. КУЖНЕНКОВ,
д. т. н. Л. В. КОЖИТОВ, д. т. н. В. Г. КОСУШКИН

Россия, г. Калуга, ОАО "Автоэлектроника",
КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана; г. Москва, МИСиС
E-mail: axauto@kaluga.ru

Дата поступления в редакцию
21.09 2001 г.

Оппонент д. ф.-м. н. И. М. ВИКУЛИН
(УНАС им. А. С. Попова, г. Одесса)

ОДИН ИЗ МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Установлен механизм возникновения отказов микроэлектромеханических структур, связанный с увеличением температурного гистерезиса выходного сигнала.

В последние годы возросли требования к надежности миниатюрных датчиков давления, которые широко применяются в промышленности и автомобилестроении.

Особое место среди датчиков занимают приборы, созданные по двум базовым технологиям — микроэлектронной и микропрофилирования кремния. Такие твердотельные устройства с интегрированными электрическими, электронными и микромеханическими структурами получили название микроэлектромеханических структур (МЭМС). Наиболее характерным представителем их является тензорезистивный датчик давления.

Целью работы являлось установление механизма деградации интегральных измерительных тензопреобразователей (ИИТП) датчиков давления.

В результате анализа датчиков давления, полученных в условиях массового производства, была выявлена группа приборов, выходной сигнал которых изменялся в течение некоторого времени эксплуатации. Анализ причин этого изменения позволил установить, что чувствительные элементы этих датчиков имеют гистерезис выходного сигнала, связанный с температурой.

Известно, что причиной гистерезиса выходного сигнала полупроводниковых приборов могут быть механические напряжения, возникающие в полупроводниковых структурах ИИТП [1,2] по различным причинам. Механические напряжения могут возникать вследствие различных коэффициентов линейного расширения материалов прибора и корпуса, а также из-за особенности конструкции (наличия прогиба мембраны чувствительного элемента, **рис. 1**) и работы прибора в условиях переменных давлений.

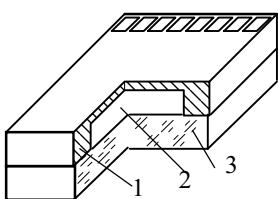


Рис. 1. Интегральный измерительный тензопреобразователь датчика давления:
1 — кремниевая микроструктура;
2 — полость с разреженным газом;
3 — стеклянная подложка

Результаты предварительного анализа причин деградации датчиков давления позволили предположить, что именно напряжения в структурах ИИТП при циклическом изменении внешнего давления, действующего на мембрану, и под воздействием переменных температур являются причиной изменения структуры кристаллической мембраны, что и приводит к изменению параметров датчика.

Расчет величины упругих напряжений в структурах ИИТП. Для анализа уровня напряжений, возникающих в мембране в условиях рассматриваемой задачи, был использован обобщенный закон Гука. Уровень возникающих напряжений для анизотропного материала (в нашем случае — кремния) можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{km}$$

где σ_{ij} и ϵ_{km} — тензоры второго ранга напряжения и деформации;

C_{ijkl} — тензор четвертого ранга модуля упругости.

В рассматриваемом случае задачу можно решать, пользуясь теорией упругости изотропных тел с учетом зависимости модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига от кристаллографических на-

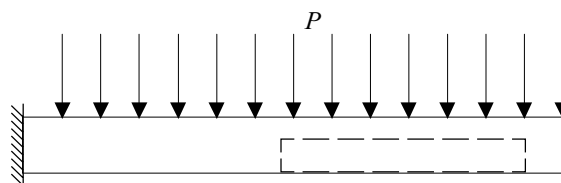


Рис. 2

правлений [3]. Схематично ИИТП может быть представлен в виде балки, жестко заштыренной с одной стороны и имеющей в середине выемку (**рис. 2**). Такой вариант крепления ИИТП в корпусе наиболее широко используется при производстве датчиков давления. Рассматриваемая деталь имеет длину 6 мм, ширину 4 мм и высоту 0,5 мм. Выемка квадратной формы 2×2 мм расположена на расстоянии 1 мм от краев. Толщина мембраны 0,05 мм. Балка нагружена сверху равномерно распределенным давлением $P=101$ кПа.

Для численного решения задачи был использован метод конечных разностей в приближении статичес-

кого анализа. Уравнение, описывающее изгиб балки, использовали в виде

$$[K]\{u\}=\{F\},$$

где $[K]$ — матрица жесткостей, $\{u\}$ — вектор перемещений, компоненты вектора сил $\{F\}$ представляют собой сосредоточенные силы. Решение проводили с использованием справочных данных с учетом рекомендаций и методик, изложенных в [3].

В результате расчетов было установлено, что в структурах ИИТП в зоне мембраны уровень напряжений превышал 10^8 Па. Известно, что при столь высоких значениях напряжений в полупроводниках могут генерироваться дефекты кристаллической решетки (дислокации), которые приводят к еще большему увеличению напряжений в окружающих локальных объемах материала [4]. Эти дефекты, по-видимому, и являлись причиной гистерезиса в рассматриваемом приборе.

Справедливость предположения о возможности генерации дислокаций в рассматриваемых условиях была подтверждена металлографическими исследованиями. Установлено, что в зоне мембраны, в местах расположения активных элементов, плотность дислокаций превышала 10^4 см^{-2} , хотя для изготовления мембран датчиков использовали бездислокационный монокристаллический кремний.

Методика и результаты испытаний ИИТП. Для выявления закономерностей изменения гистерезиса со временем в рабочих режимах датчика была сделана случайная выборка датчиков в количестве (n) 100 шт. У всех датчиков был измерен гистерезис выходного сигнала. Величину выходного сигнала измеряли при температуре $+25^\circ\text{C}$, затем при температуре $+125^\circ\text{C}$, затем температуру вновь снижали до $+25^\circ\text{C}$ и повторяли измерения. Гистерезис (Γ) определяли как разность значений выходных сигналов при температуре 25°C , измеренных до и после повышения температуры. При выполнении экспериментов внешнее давление поддерживали постоянным.

Полученное распределение величины гистерезиса, показанное на **рис. 3**, может быть описано нормальным законом распределения случайных величин. Это позволило для дальнейших исследований отобрать четыре датчика с гистерезисом, равным сред-

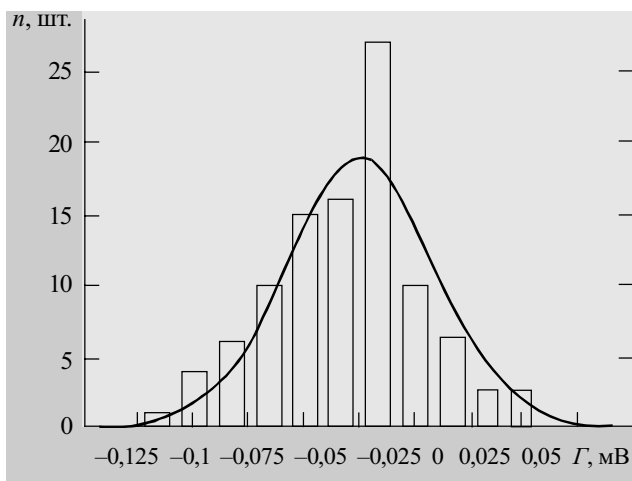


Рис. 3

нестатистическому (математическому ожиданию) — $-0,022$ мВ.

Отобранные датчики были испытаны на наработку в течение 167 ч в форсированном режиме при температуре $+85^\circ\text{C}$, что соответствовало (с учетом коэффициента ускорения) наработке в нормальных условиях продолжительностью 13000 ч. Кроме того, датчики подвергали воздействию переменного давления с амплитудой 85 кПа и количеством циклов 30 тысяч. Гистерезис у этих образцов составил 0,410, 0,380, 0,350 и 0,390 мВ. Увеличение гистерезиса в среднем составило 0,405 мВ.

В дальнейшем эти образцы прошли наработку продолжительностью 80 ч при температуре $+125^\circ\text{C}$, что, с учетом коэффициента ускорения, также соответствовало 13000 ч в условиях обычной эксплуатации. Датчики также были подвергнуты воздействию переменного давления с амплитудой 85 кПа и количеством циклов 15 тысяч. В этом случае гистерезис возрос в среднем на 0,2 мВ.

Для уточнения причин возникновения гистерезиса опытные образцы были выдержаны при температуре $+200^\circ\text{C}$ в течение 20 ч. Величина температурного гистерезиса после этого составила 0,06 мВ (см. **таблицу**).

Изменение величины гистерезиса

	Начальная величина гистерезиса Γ_1 , мВ	Величина гистерезиса после наработки Γ_2 , мВ	Величина изменения гистерезиса $\Delta\Gamma$ (приrost) после испытаний, мВ	Параметры процесса наработки		Продолжительность наработки в пересчете на нормальные условия, ч	Количество циклов воздействия переменного давления
				Продолжительность, ч	Температура, $^\circ\text{C}$		
Наработка 1	-0,022	0,383	0,405	167	+85	13 000	30 000
Наработка 2	0,383	0,583	0,200	80	+125	13 000	15 000
Стабилизация	0,583	0,060	0,523	20	+200	—	—

Математическая модель изменения температурного гистерезиса ИИТП. Полученные результаты могут быть описаны уравнением

$$G(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2,$$

где $G(t)$ — величина гистерезиса как функция времени t ;

a_n — коэффициенты регрессии ($a_0 = -0,022$, $a_1 = 3,904 \cdot 10^{-5}$, $a_2 = -6,065 \cdot 10^{-10}$).

Эта модель была получена методом полиномиальной регрессии экспериментальных данных. Необходимо отметить, что в модели коэффициент a_0 является начальным значением величины температурного гистерезиса выходного сигнала ИИТП, а коэффициент a_1 можно считать средневзвешенной скоростью изменения температурного гистерезиса ИИТП со временем.

Полученная математическая модель позволяет оценить величину гистерезиса выходного сигнала со временем. С учетом коэффициента усиления датчика на основе его калибровочной характеристики можно оценить время, за которое проявится отказ датчика. Отказавшим можно считать датчик, величина температурного гистерезиса которого превысит 1/2 от ширины поля допуска на калибровочную характеристику. Так, расчеты показали, что в рассматриваемой партии датчиков через 5,5 тыс. часов может возникнуть параметрический отказ у 10% изделий, а через 18 тыс. часов могут отказать все 100% датчиков.

В результате исследований впервые установлен один из механизмов деградации датчиков давления, связанный с увеличением температурного гистерезиса выходного сигнала. Этот механизм является наиболее вероятным, поскольку датчики, изготовленные на базе МЭМС, работают в условиях переменных воздействий механических нагрузок. Анализ различных приборов, созданных на базе МЭМС, показал, что в большинстве случаев они работают в режиме малых электрических нагрузок, а по своей структуре являются аналогом интегральной микросхемы с низкой степенью интеграции. В таких условиях их ресурс составлял бы сотни тысяч часов [5], согласно же проведенным исследованиям и расчетам он ограничивается тысячами часов.

На основании сказанного выше было сделано предположение о том, что для снижения величины температурного гистерезиса выходного сигнала ИИТП необходимо устранить причины возникновения упругих механических напряжений в их структурах. Оптимизация технологического процесса изготовления датчиков (изменение технологии формирования отверстий в стекле, на которое крепилась мембрана) позволила снизить величину гистерезиса выходного сигнала датчиков до 0,01 мВ против 0,07 мВ по базовой технологии.

В результате проведенных исследований впервые установлен один из механизмов деградации и, как ее следствие, механизм возникновения отказов микроэлектромеханических структур ИИТП датчиков давления, связанный с увеличением температурного гистерезиса выходного сигнала. Также установлено, что путем оптимизации ряда технологических процессов изготовления датчиков давления можно добиться как снижения скорости увеличения гистерезиса, так и уменьшения его величины.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Адарчин С. А., Кужненко А. С. Исследование процессов деградации микроэлектромеханических структур // 1-я Рос. конф. молодых ученых по математическому моделированию.— М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.— С. 138.
2. Адарчин С. А., Кужненко А. С. Исследование процессов деградации микроэлектромеханических структур датчиков давления // 5-я междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2000».— Новосибирск, 2000.— Т. 4. С. 287.
3. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи.— М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в полупроводниках.— М.: Металлургия, 1987.
5. Шавыкин Н. А., Петрухин Б. П. Модели расчета показателей безотказности некоторых видов датчиков и выходных исполнительных устройств систем управления // Датчики и системы.— 2001.— № 9.— С. 8—12.

ISSN 0234-6206

ПРОБЛЕМЫ

МАШИНОСТРОЕНИЯ
И АВТОМАТИЗАЦИИ

ENGINEERING & AUTOMATION

Международный научно-технический журнал,
периодичность — 4 номера в год.

Начало издания — 1982 г.

Главный редактор академик РАН К. В. Фролов.

Для научных, инженерно-технических работников,
аспирантов и студентов.

Зарегистрирован в ВАК РФ.

Журнал публикует результаты научных исследований и практических разработок в России и за рубежом по актуальным проблемам машиностроения, а также материалы (обзоры, статьи, сообщения) о передовом опыте, новых материалах и прогрессивных технологиях, включая проблемы управления и автоматизации.

Цена годового комплекта 18 ам. дол.

Цена одного номера 5 ам. дол. НДС 10%.

Расходы на пересылку — 30% от стоимости журнала.
Библиотекам России и стран СНГ предоставляется скидка — 50% от стоимости заказа.

Заказы на журнал принимаются непосредственно редакцией.

Россия, 101990, Москва, Лубянский проезд, 5, комн. 7,

Московский городской центр научно-технической информации

Тел.: (095) 921 24 40 Факс: (095) 928 60 39

E-mail: MOSCNTL.RIR@g23.telcom.ru