

Ю. З. БУБНОВ, Г. В. БИРЮЛИН, В. И. ЕГОРОВ, С. В. ПОСТЕРНАКОВ

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ

Представлены результаты конечно-элементного моделирования нестационарного теплового поля мембранной структуры сенсора газосигнализатора с нагревателем, работающим в импульсном режиме.

Ключевые слова: газосигнализатор, мембрана, моделирование, тепловой режим.

В странах с развитой промышленностью выделяются значительные средства на создание систем экологического мониторинга и портативных газоаналитических приборов и сигнализаторов, своевременно информирующих о превышении содержания в воздухе токсичных и горючих газов, что позволяет оценивать границы допустимости технологических процессов и предупреждать нежелательные явления, например пожары.

Анализ путей развития газовых сенсоров показал, что наиболее перспективными для массового применения являются полупроводниковые газовые сенсоры, отличающиеся высокой надежностью, простотой в эксплуатации и низкой стоимостью.

Одна из особо важных задач в повышении потребительских характеристик полупроводниковых газовых сенсоров — снижение их энергопотребления, что связано, в первую очередь, с условиями работы газоаналитических приборов в автономном режиме, т.е. при электропитании от портативных аккумуляторов. Потребляемая мощность этих приборов должна составлять нескольких десятков милливольт.

Как показывает анализ конструкторско-технологических решений по минимизации потерь тепла, наиболее предпочтительным является применение мембранных структур, совмещенных с подложкой сенсора, которая подвешивается к выводам корпуса сенсора с помощью тонкой золотой проволоки. При этом для эффективной экономии тепла при использовании мембраны в рабочей зоне кристалла ее толщина (h) должна быть менее 5 мкм. Минимальная

толщина мембраны при существующих конструкторско-технических ограничениях составляет 2—4 мкм. При выборе конструкции сенсора и параметров режимов работы нагревателя необходимо иметь подробную информацию по распределению температуры в кристалле в различные моменты времени.

В конструкции сенсора используется корпус широко применяемого транзистора; схема конструкции представлена на рис. 1, где 1 — основание корпуса, 2 — крышка, 3 — кремниевая подложка. В крышке 2 имеется отверстие для доступа внутрь корпуса анализируемых газов. На мембране кремниевой подложки размещены компоненты сенсора, изготовленные по пленочной технологии.

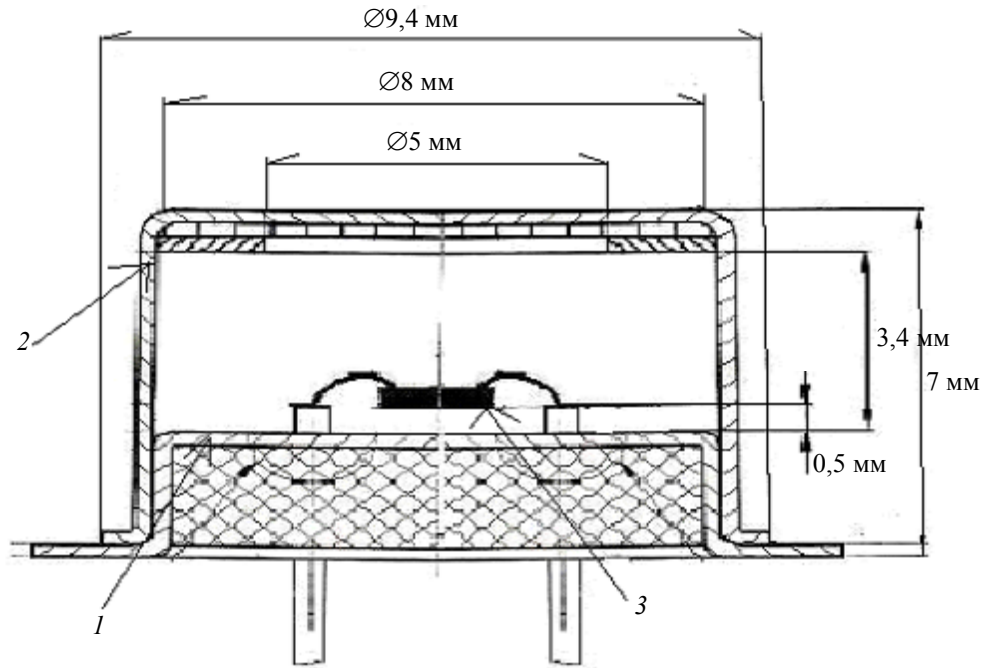


Рис. 1

Нагреватель, в качестве которого используется слой поликремния толщиной 0,4 мкм, размещен в центре мембраны и имеет размеры 0,62×0,68 мм. Нагреватель работает в импульсном режиме с периодом порядка 6 с. Длительность (τ_n) максимального нагрева составляет примерно 1 с. Схематично разрез подложки представлен на рис. 2, где 1 — кремниевая подложка, 2 — мембрана, 3 — чувствительный слой, 4 — нагреватель.

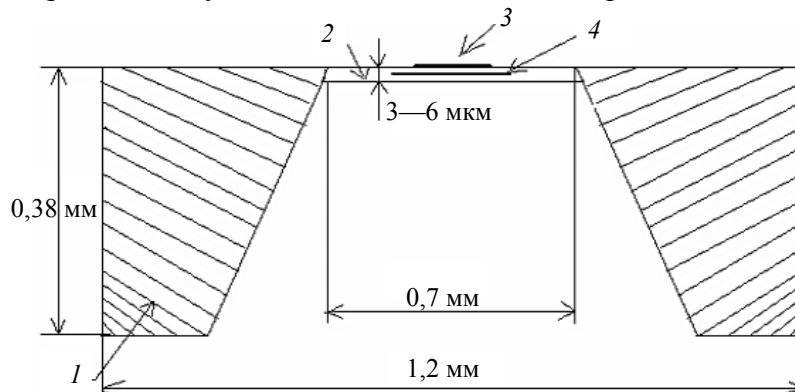


Рис. 2

Расчет нестационарного нелинейного трехмерного температурного поля подложки сложной геометрической формы проводился с помощью компьютерной программы, основанной на методе конечных элементов. В математической и тепловой моделях коэффициенты конвективного теплообмена являются функцией температуры; коэффициент лучистого теплообмена рассчитывался в программе непосредственно по формуле Стефана — Больцмана

при коэффициенте черноты 0,9. По технологическим причинам необходимо обеспечить периодический нагрев сенсора до 450 °С и охлаждение до 100 °С, поэтому напряжение на нагреватель подается в импульсном режиме с периодом примерно 6 с: нагрев — 1 с, остывание — 5 с. Так как сопротивление нагревателя зависит от температуры, его мощность непостоянна.

Экспериментально была определена зависимость сопротивления нагревателя от его температуры; мощность нагревателя в программе задавалась в виде нелинейной функции

$$P(\tau, t) = \frac{U^2(\tau)}{R(t)},$$

где $U(\tau)$ — функция напряжения от времени, $R(t)$ — зависимость сопротивления нагревателя от температуры, $P(\tau, t)$ — функция мощности.

В результате расчета было получено распределение температур в объеме подложки в зависимости от времени для различных толщин мембраны и различной средней мощности импульса. В таблице приведены полученные значения температур, где t_{\max} и t_{\min} — максимальное и минимальное значение температуры чувствительного элемента, расположенного над нагревателем; Δt_n и Δt_m — максимальный перепад температуры по нагревателю и по мембране соответственно.

h , мкм	P , Вт	t_{\max} , °С	t_{\min} , °С	Δt_n , °С	Δt_m , °С
3	0,42	510	90	110	150
3	0,57	570	100	130	220
4	0,42	365	80	70	120
4	0,5	440	90	85	140
4	0,57	515	100	100	165
6	0,57	460	90	70	120

На рис. 3 представлен график распределения температуры $t(x)$ в плоскости мембраны в момент окончания действия нагревателя (при $h = 4$ мкм, $P = 0,42$ Вт), где $x = 0$ соответствует центру мембраны, а $x = 0,35$ мм — краю мембраны.

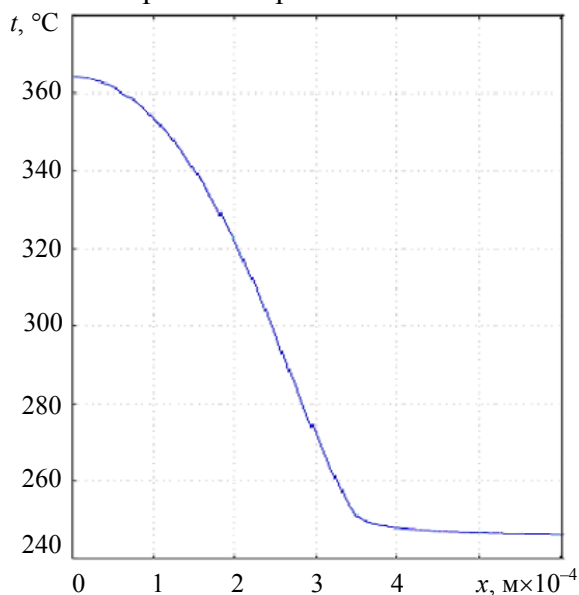


Рис. 3

В процессе нагрева в зоне тепловыделений на мембране возникает высокая неравномерность температурного поля. Наблюдается резкое падение температуры в зоне перехода от мембраны к массиву кремния.

Экспериментальные исследования газоаналитических характеристик сенсоров с мембраной толщиной 3—4 мкм показали, что максимальная величина отклика на 0,5 % CH₄ достигается при $P = 0,4 \pm 0,03$ Вт, при этом длительность нагрева $\tau_n = 1,0$ с, а период 5 с. Эти

параметры хорошо согласуются с данными, приведенными в таблице. Также известно [1, 2], что максимум отклика полупроводникового газового сенсора на метан соответствует температуре его чувствительного элемента (400—430 °С). Это косвенно подтверждает достоверность теплового расчета.

Использование сенсора без мембраны увеличивает среднюю мощность в 3 раза [3], что доказывает эффективность применения мембранных сенсорных структур.

Хорошее соответствие результатов тепловых расчетов и экспериментальных данных свидетельствует о возможности применения полученной тепловой модели при проектировании других типов сенсоров с мембраной и выборе режимов их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов Ю. З. Полупроводниковые газовые сенсоры // Петербургский журнал электроники. 1996. № 3. С. 87—91.
2. Датчики газов: “Figaro” (Япония). М.: Изд. дом „Додэка—XXI“, 2003.
3. Бубнов Ю. З., Голиков А. В., Казак А. В. Полупроводниковые газовые сенсоры и газоаналитические приборы на их основе // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. Спецвыпуск. С. 72—80.

Сведения об авторах

- | | |
|--|---|
| Юрий Захарович Бубнов | — д-р техн. наук, профессор; ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург; главный конструктор |
| Гавриил Владимирович Бирюлин | — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: gavrila@bk.ru |
| Владимир Иванович Егоров | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: KTF@grv.ifmo.ru |
| Сергей Владимирович Постернаков | — ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург; вед. инженер |

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.