

*А.В. Прусский, преподаватель, ИГУ ГЗ УГЗУ,
В.Д. Калугин, д. х. н., профессор, УГЗУ*

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ СПИРАЛЕВИДНОГО ТИПА

Построены математические модели зависимостей аналитического сигнала и времени насыщения полупроводникового датчика (ППД) газового пожарного извещателя (ГПИ) от величины тока и количества витков нагревателя ППД. Проведена оптимизация некоторых технических характеристик ГПИ с полупроводниковым чувствительным элементом спиралевидного типа (ППЧЭ СТ).

Постановка проблемы. Экспериментальные исследования динамики выделения продуктов горения при пожаре показывают, что использование дымовых, тепловых и пожарных извещателей пламени для раннего выявления начальной стадии возгорания твердых горючих материалов (ТГМ) (термическое разложение (тление)) – по газообразным продуктам – является неэффективным. Поэтому актуальной проблемой является разработка газовых пожарных извещателей, а также оптимизация их технических характеристик.

Анализ последних исследований и публикаций. В последние годы интенсивно развиваются исследования в области выявления возгорания ТГМ на стадии его зарождения (по газообразным продуктам), в частности, по созданию сверхчувствительных датчиков первичной информации систем пожарной сигнализации – газовых пожарных извещателей. При этом, обосновывается перспектива и актуальность этих исследований и разработок [1-4].

Однако в работах [1-4] не приводятся результаты исследований на стадии разработок конструкций и оптимизации параметров газовых пожарных извещателей с полупроводниковыми чувствительными элементами по установлению влияния конструктивных параметров и характеристик чувствительного элемента ГПИ на основные технические характеристики последнего, что значительно снижает эффективность использования пожарного извещателя данного типа при обнаружении пожаров.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является оптимизация некоторых технических характеристик предлагаемого в работе ГПИ с полупроводниковым чувствительным элементом спиралевидного типа.

В целях исключения возможности ложных срабатываний, а также обеспечения высокой эффективности использования ГПИ с ППЧЭ СТ при выявлении очага возгорания – концентрация СО во время проведения всех опытов была принята равной 10 ppm. Данное значение находится в диапазоне между фоновым уровнем СО, при нормальных условиях в воздухе окружающей среды (0.072 ppm), и ПДК СО в воздухе рабочей зоны – 20 мг/м³ (16 ppm) [5], а также минимальным значением концентрации СО для обнаружения ГПИ – 20 ppm [6].

Практически во всех известных конструкциях ЧЭ ГПИ – ПП сенсорах [7] в качестве токоподводов (электродов) и нагревателя используются благородные металлы (Pt, Au). В данной работе для этих конструктивных элементов ППД предложено использовать нихром (Ni-Cr). Нихром обладает большим сопротивлением по сравнению с золотом и платиной и по сравнению с сопротивлением чувствительной массы дает больший шунтирующий эффект в предложенной конструкции ППД ГПИ. При использовании пары «нихром – чувствительная масса (ЧМ)» присутствуют разносторонне направленные температурные векторы (в отличие от сочетаний «Pt, Au – ЧМ»), что обеспечивает термокомпенсацию величины аналитического сигнала в предлагаемой конструкции ППД ГПИ без применения дополнительных технологий и приборов.

Для обеспечения минимизации энергопотребления конечного изделия (ГПИ) выбран нихром с диаметром 20 мкм. Установлено, что оптимальным для получения ЧМ расстоянием между витками спирали является расстояние равное 10 мкм, так как при большем значении не возможно сформировать ЧМ на спирали, а при меньшем значении межветкового расстояния происходит замыкание витков спирали. С учётом вышесказанного оказывается, что единственным варьируемым конструкционным параметром ЧЭ ГПИ остается длина спирали или количество ее витков.

Для обеспечения эффективной и стабильной работы ЧМ ППД ГПИ к ней подводится ток – для нагрева спирали и ЧМ. При этом, ток нагревателя может изменяться в пределах от 0 до 80 мА, что обусловлено особенностями выбранной нити нихрома. Установлено, что при токах ниже 20-25 мА аналитический сигнал датчика на СО очень мал и не отображает реальной картины изменения концентрации СО в помещении. Экспериментально обосновано, что минимальный ток нагревателя составляет 30 мА. Эксперименты показали, что при токах выше 55 мА в массе чувствительного элемента возникают температурные напряжения, которые вызывают разрушение чувствительной массы. Последнее приводит к изменению технических характеристик ППД ГПИ и к невозможности его дальнейшего использова-

ния. Таким образом, максимальное значение тока нагревателя принимаем равным 50 мА.

Поскольку исследовали влияние только двух факторов – ток и количество витков нагревательного элемента чувствительной массы, то был поставлен эксперимент типа 2^2 [8]. Для построения полинома второго порядка использовали метод, предложенный Г.Э.П. Боксом и К.Б. Вильсоном [9], согласно которому использовали ортогональные планы первого порядка в качестве ядра, на котором потом достраивали конструкцию плана второго порядка. В работе использовали ротатабельные планы второго порядка, так как они, в отличие от ортогональных, позволяют предусмотреть значение функции отклика с дисперсией, одинаковой на равных расстояниях от центра плана [10]. Для этого дополнительно проводили эксперименты в центре плана (на нулевом уровне) и на расстоянии d от центра. В этом случае звездное плечо d выбирали из условия инвариантности плана к обращению. В условиях проведения двухфакторного эксперимента для построения центрального композиционного ротатабельного плана брали 4 звездные точки и 5 точек на нулевом уровне. Величина плеча d для звездных точек равняется 1.414. Ротатабельный план второго порядка представлен в таблице 1. Матрица двухфакторного эксперимента по определению зависимости величины аналитического сигнала и времени насыщения от тока нагревателя и количества его витков приведена в таблице 2.

Таблица 1 – Центральный композиционный ротатабельный план второго порядка для двух факторов. Обозначение: Y_U – отклик аналитического сигнала насыщения ППД (мВ); Y_T – отклик времени насыщения ППД (с)

Опыт	x_0	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	Y_U	Y_T
Планирование типа 2^2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	131	374
	+1	+1	-1	+1	+1	+1	140	346
	+1	-1	+1	+1	+1	+1	143	395
	+1	+1	+1	+1	+1	-1	152	356
Звездные точки	+1	-1.414	0	2	0	0	137	379
	+1	+1.414	0	2	0	0	149	331
	+1	0	-1.414	0	2	0	109	300
	+1	0	+1.414	0	2	0	196	322
Нулевые точки	+1	0	0	0	0	0	170	289
	+1	0	0	0	0	0	171	292
	+1	0	0	0	0	0	169	292
	+1	0	0	0	0	0	169	287
	+1	0	0	0	0	0	170	285

Таблица 2 – Кодирование данных

Уровень и интервал изменения факторов	Ток нагревателя ($I_{нагр.}$), мА	Количество витков нагревателя (N)
Нулевой уровень, $x_i=0$	40	7.5
Интервал изменения, δ_i	10	2.5
Верхний уровень, $x_i=1$	50	10
Нижний уровень, $x_i= -1$	30	5
Кодовое обозначение	X_1	X_2

Расчет коэффициентов регрессии по результатам экспериментов проводили по следующим формулам

$$b_0 = \delta'_0 \sum_{u=1}^n y_u - \delta''_0 \sum_{u=1}^n \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 y_u ; \quad (1)$$

$$b_i = \delta_i \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u ; \quad (2)$$

$$b_{ij} = \delta_{ij} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} y_u ; \quad (3)$$

$$b_{ii} = \delta'_{ii} \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u + \delta''_{ii} \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u - \delta'''_{ii} \sum_{u=1}^n y_u . \quad (4)$$

Значения δ , которые входят в формулы (1)–(4), брались из [10]: $\delta'_0 = 0,2$, $\delta''_0 = 0,1$, $\delta_i = 0,125$, $\delta_{ij} = 0,25$, $\delta'_{ij} = 0,125$, $\delta''_{ij} = 0,0188$, $\delta'''_{ij} = 0,1$.

Из расчета получили модели следующего вида

$$Y_U = -0.2 \cdot x_1^2 + 15.8 \cdot x_1 - 1.5 \cdot x_2^2 + 22.2 \cdot x_2 + 0.03 \cdot x_1 \cdot x_2 - 263.4; \quad (5)$$

$$Y_T = 0.4 \cdot x_1^2 - 36 \cdot x_1 + 2.4 \cdot x_2^2 - 23.7 \cdot x_2 - 0.2 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1138.6. \quad (6)$$

Таким образом, получили модели для аналитического сигнала (5) и времени (6) насыщения ППД ГПИ от тока и количества витков нагревателя (спираль из нихромовой нити), на которой формируется чувствительная масса ППД ГПИ.

Получив полиномиальную модель проводим статистическую оценку. Проверяем воспроизводимость процесса по критерию Кохрена по формуле

$$G = \frac{S_{уммак}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2} \leq G_{(0.05; f_n; f_u)} . \quad (7)$$

где $s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - y_u^-)^2}{m-1}$ – дисперсия, характеризующая рассеяние результатов опытов на u -м сочетании уровней факторов; y_{up} – расчетное значение отклика в u -м опыте; $p=1,2,\dots, m$ – число параллельных опытов; $s_{u \text{ макс}}^2$ – наибольшая из дисперсий в строчках плана; $G_{(0,05;f_n;f_u)}$ – табличное значение критерия Кохрена при 5% – м уровне значимости; $f_n = n$ – число независимых оценок дисперсии; $f_u = m-1$ – число степеней свободы каждой оценки.

По критерию Стьюдента проверяли значимость коэффициентов. Доверительный интервал определялся по формуле

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \sqrt{\frac{s_y^2}{n}} \quad (8)$$

где $t_{(0,05;f_y)}$ – 5% – ная точка распределения Стьюдента с f_y – степенями

свободы, $t=2,7764$; $s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n}$ – дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта) [10].

Для модели (5) доверительный интервал составляет – 0.0529, поэтому коэффициент при $(x_1 x_2)$ считается незначимым. Для модели (6) доверительный интервал составляет – 0.159, поэтому все коэффициенты считаются значимыми. Таким образом, модели (5) и (6) принимает такой вид

$$Y_U = -0.2 \cdot x_1^2 + 15.8 \cdot x_1 - 1.5 \cdot x_2^2 + 22.2 \cdot x_2 - 263.4; \quad (9)$$

$$Y_T = 0.4 \cdot x_1^2 - 36 \cdot x_1 + 2.4 \cdot x_2^2 - 23.7 \cdot x_2 - 0.2 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1138.6. \quad (10)$$

Ошибка опыта при ротатабельном планировании может определяться по экспериментам в центре плана

$$s_0^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1} \quad (11)$$

где y_{0u} – значение отклика в u -м опыте в центре плана при ротатабельном планировании.

Числитель формулы (11) представляет собой остаточную сумму квадратов в центре плана

$$S_o = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - y_0)^2. \quad (12)$$

Из выражения (11) очевидно, что с этой суммой связано число степеней свободы $f_0 = n_0 - 1$. Общая окончательная сумма квадратов плана

$$S_{\text{общ}} = \sum_{u=1}^n (y_u - y_{\text{уррас}})^2. \quad (13)$$

с числом степеней свободы

$$f_{\text{общ}} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}. \quad (14)$$

Дисперсия адекватности модели характеризуется суммой

$$S_{\text{ад}} = S_{\text{общ}} - S_o. \quad (15)$$

с числом степеней свободы

$$f_{\text{ад}} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2} - (n_0 - 1). \quad (16)$$

где k – количество факторов в эксперименте, в нашем случае – $k=2$.

Дисперсия адекватности

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ад}}}{f_{\text{ад}}}. \quad (17)$$

Адекватность моделей проверяется по критерию Фишера

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_0^2} \leq F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)}. \quad (18)$$

где $s_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1}$; y_u – расчетное значение отклика в u -м опыте;

$F_{(0.05; f_{\text{ад}}; f_y)}$ – критерий Фишера при 5% – м уровне значимости;

$f_{\text{ад}} = n - k - 1$ – число степеней свободы дисперсии адекватности; f_y – число степеней свободы дисперсии воспроизведения.

Таким образом, для модели (9) имеем по критерию Кохрена: $0,5193 < 0,9065$, для модели (10) – $0,6382 < 0,9065$, т.е. процессы воспроизводятся, а по критерию Фишера соответственно – $6,784 < 7,7086$ и $7,482 < 7,7086$, т.е. модели адекватные. Графическое изображение моделей (9) и (10) приведено на рис. 1 и 2.

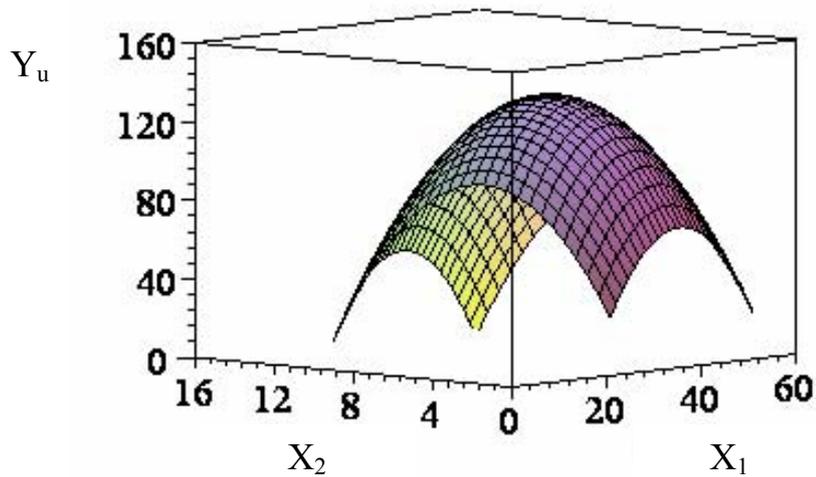


Рисунок 1 – Зависимость отклика аналитического сигнала насыщения ПД ГПИ от тока и количества витков нагревателя

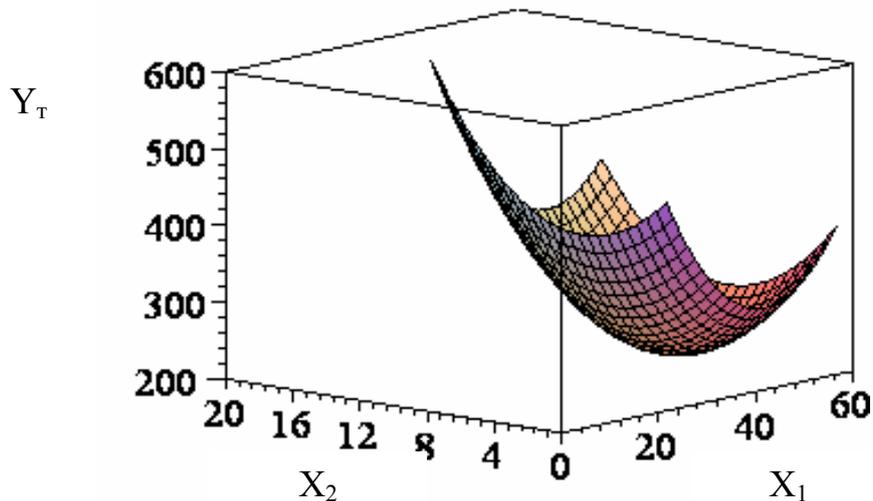


Рисунок 2 – Зависимость времени насыщения ПД ГПИ от тока и количества витков нагревателя

Оптимизацию параметров (ток и количество витков нагревателя), при которых аналитический сигнал и время насыщения ППД ГПИ будут иметь максимальное и минимальное значения соответственно, проводим следующим образом

1) для модели (9)

$$\frac{dY_U}{dx_1} = -0.4 \cdot x_1 + 15,8 = 0;$$

$$\frac{dY_U}{dx_2} = -3 \cdot x_2 + 22,2 = 0.$$

откуда: $x_1=39,5$; $x_2=7,4$;

2) для модели (10):

$$\frac{dY_T}{dx_1} = 0,8 \cdot x_1 - 0,2 \cdot x_2 - 36 = 0;$$

$$\frac{dY_T}{dx_2} = 4,8 \cdot x_2 - 0,2 \cdot x_1 - 23,7 = 0.$$

откуда: $x_1=44,265$; $x_2=2,94$.

В результате проведенного анализа поведения функций моделей (9) и (10) получили оптимальные значения $x_1=39,5$ и $x_2=7,4$, которые обеспечивают максимальное значение аналитического сигнала (131 мВ) и минимальное значение времени насыщения ППД ГПИ (239 с).

Таким образом, пользуясь выражением (19), определяем инерционность ГПИ (τ) с предложенным в работе ППД при токе нагревателя 39,5 мА и количестве витков нагревателя 7,5

$$\tau = Y_T^{\text{мин}} / 3 \quad (19)$$

Получаем: $\tau = 80$ с.

Выводы. На основе планирования эксперимента построены математические модели зависимостей аналитического сигнала и времени насыщения полупроводникового датчика газового пожарного извещателя от величины тока и количества витков нагревателя ППД. Проведена оптимизация некоторых технических характеристик газового пожарного извещателя с полупроводниковым чувствительным

элементом спиралевидного типа, а именно: с помощью построенных математических моделей определены максимально эффективные режимы и конструктивные параметры функционирования ППД ГПИ – по току 39.5 мА, по числу витков нагревателя – 7.5, обеспечивающие минимальное значение инерционности предложенного в работе ГПИ с ППЧЭ СТ – 80 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А. Васильев, И.М. Олихов, В.И. Антоненко. Раннее обнаружение пожара. Полупроводниковые газовые сенсоры. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2001, №4. - С. 19-26.
2. А.В. Федоров, А.А. Лукьянченко. Применение газовых сенсоров в системах автоматической пожарной сигнализации. // Мир и безопасность, 2004, № 4. - С. 29-32.
3. А.А. Васильев, И.М. Олихов, А.В. Соколов. Газовые сенсоры для пожарных извещателей. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2005, №2 – С. 24-27.
4. А.В. Федоров, А.А. Лукьянченко, А.В. Соколов. Экспериментальные исследования полей концентраций водорода и оксида углерода на ранней стадии пожара в помещениях и определение рациональных мест установки газовых пожарных извещателей // Пожаровзрывобезопасность. – 2006, №3 – С. 74 – 84.
5. ГОСТ 12.1.005–88. Общие санитарно–гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. 47 с.
6. НПБ 71–98. Извещатели пожарные газовые. Общие технические требования. Методы испытаний / Пожаровзрывобезопасность. – 2002, №4. – С. 58 – 64.
7. Напівпровідникові сенсори: Теорія, конструкція, застосування / Буданов П.Ф., Даник Ю.Г., Заславська О.Ю., Калугін В.Д., Карпенко В.І., Сергєєв А.В. За ред. Ю.Г. Даника. - Харків: Вид-во Нац. ун-ту внутр. справ, 2001. - 252 с.
8. Кренецкий И.И. Основы научных исследований. Уч. пособие для вузов. – Киев – Одесса, 1981. – 208 с.
9. Vox G.E.P., Wilson K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. – “Journal of the Royal Statistical Society”. Series B, 1951, 13, № 1, P. 1 – 45.
10. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – «Техника», 1975. – 168 с.

Статья поступила в редакцию 19.09.2008 г.