

Представлены материалы третьей главы монографии "Новые методы и технические средства обнаружения пожара", в которой рассмотрены различные новые направления совершенствования тепловых пожарных извещателей.

ГЛАВА 3

3.1. Направления совершенствования пожарных извещателей

Развитие электроники, широкое применение современных элементной базы и технологии монтажа позволяет значительно увеличить надежность технических средств обнаружения пожара.

Применение микроконтроллеров за счет усложнения алгоритмов анализа сигналов создает дополнительную возможность повышения достоверности функционирования при одновременном снижении времени обнаружения пожара. Одним из направлений реализации такой возможности является расширение информационной базы для анализа с целью принятия правильного решения о пожаре за минимально короткие сроки [3.1].

Рассмотрим источники получения дополнительной информации о состоянии объекта в результате анализа контролируемого признака (фактора) пожара. Исследуем функциональную зависимость фактора от времени как непрерывную, дифференцируемую во всех точках рассматриваемого временного интервала Ω [3.3]. Разложение данной функции $F(t)$ в степенной ряд будет иметь вид:

$$F(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (t - t_0)^n \quad \forall t \in \Omega, \quad (3.1.1)$$

где t – время; a_n – функции, определённые на множестве Ω .

Считая момент времени t_0 началом наблюдений $t_0 = 0$, получим представление рассматриваемой функции в виде ряда Маклорена:

$$F(t) = F(0) + F'(0)t + \frac{1}{2}F''(0)t^2 + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{F^{(n)}(0)}{n!}t^n. \quad (3.1.2)$$

Для пороговых извещателей превышение функции $F(t)$ установленного значения $F_{\text{пор}}$ приводит к формированию тревожного извещения:

$$F(t) > t_1 > F_{\text{пор}}. \quad (3.1.3)$$

Каждое из слагаемых в выражении (3.1.2) содержит определенную информацию о процессе изменения состояния объекта. В качестве примера

рассмотрим их для таких наиболее распространенных факторов пожара, как тепло и дым.

$F(0)$ можно охарактеризовать как начальное значение контролируемого фактора при отсутствии пожара. Для оптико-электронных дымовых извещателях этот информационный признак сравнительно недавно начал использоваться:

- для контроля работоспособности извещателя (по наличию фоновой сигнала);
- для контроля запыленности дымовой камеры (по значению фоновой засветки) с целью повышения помехозащищенности путем регулирования порога срабатывания;
- для определения необходимости проведения профилактических (регламентных) работ при повышенном значении фоновой засветки.

Для теплового порогового извещателя авторами предложено использовать начальное значение температуры для стабилизации инерционности его срабатывания [3.2].

dF/dt характеризует скорость изменения фактора пожара. Для тепловых пожарных извещателей данный информационный признак используется давно, и на его основе существуют и серийно выпускаются три вида извещателей – дифференциальный, максимально-дифференциальный и с дифференциальной характеристикой. Для извещателей, использующих другие факторы пожара, применение данного признака пока не выявлено.

d^2F/dt^2 – ускорение изменения фактора пожара, так же как и скорость характеризует динамику развития пожара. Косвенно динамические характеристики контролируемого фактора учитываются в адресно-аналоговых системах пожарной сигнализации. Например, в системе фирмы "Болид" на основе извещателей "ДИП - 34А" учитывается "история" изменения задымленности для исключения оператором ложных сигналов тревоги. Однако как в аналоговых системах, так и в автоматических пороговых извещателях ускорение как информационный признак пожара пока не используется.

$$\sum_{n=3}^{\infty} \frac{F^{(n)}(0)}{n!} t^n \text{ – слагаемое, учитывающее наличие высших производ-}$$

ных, характеризует нестабильность (флуктуации) контролируемого фактора пожара. Такая нестабильность, например температуры, может присутствовать в начальной стадии пожара и использоваться для его раннего обнаружения [3.3].

Следует отметить, что в зависимости от характера объекта, пожарной нагрузки и связанных с этим условий развития пожара некоторые из информационных признаков могут использоваться как дополнительные не только для уменьшения времени, но и для увеличения достоверности обнаружения пожара. Учет дополнительных признаков особенно важен для

быстроразвивающихся пожаров. Изменение алгоритма принятия решения в каждом конкретном случае может осуществляться путем программирования при начальной установке извещателя или в процессе функционирования с центрального процессора в автоматическом режиме или с пульта оператора (рис. 3.1).

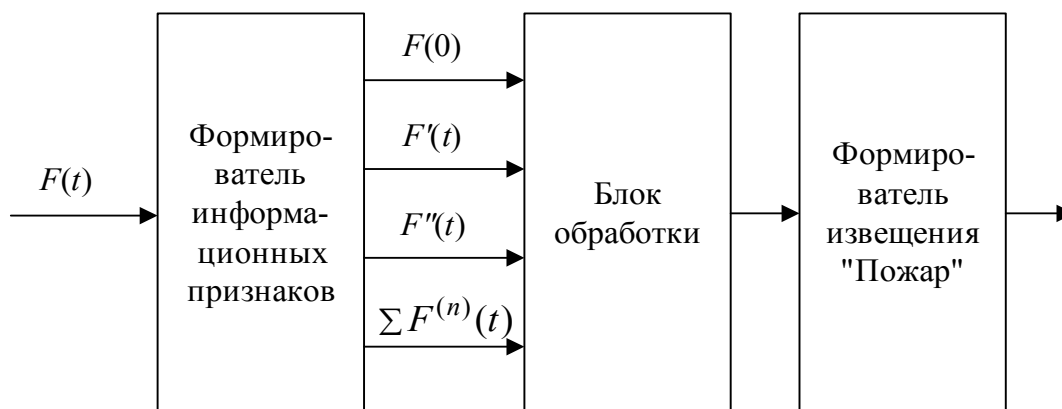


Рис. 3.1. Обобщенная функциональная схема устройства обнаружения пожара

Совершенствование методов обнаружения пожара является важной научно-технической проблемой, направленной на повышение эффективное функционирования систем пожарной безопасности объектов.

Перспективным направлением для её решения является статистический подход. В соответствии с ним задача обнаружения может быть представлена как задача нахождения порога срабатывания извещателя (или порога принятия решения оператором в автоматизированной системе пожарной сигнализации) при изменении контролируемого фактора (признака). Одним из методов ее решения является метод классификации двух объектов, соответствующих появлению событий пожара и помехи [3.4].

Рассмотрим случай, когда вероятности появления сигналов пожара и помехи одинаковы, а закон распределения их плотности вероятности - нормальный. Параметры законов распределения известны априорно и равны: m_1, σ_1 – для сигнала помехи;

m_2, σ_2 – для сигнала о пожаре,

где m, σ соответственно математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение непрерывной случайной величины – значения контролируемого признака.

Математическое ожидание m определяет среднее значение признака. Для помехи – это значение для наиболее часто встречающихся условий эксплуатации средств обнаружения пожара. Дисперсия σ характеризует среднеквадратичное отклонение значения признака, наблюдаемое на прак-

тике. Для помехи большее значение σ соответствует менее стабильным условиям на объекте.

В соответствии с T^2 статистикой [3.4] оптимальным порогом принятия решения (решающим правилом) является значение признака $F_{\text{пор}}$, для которого выполняется равенство:

$$F_{\text{пор}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} m_1 + \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} m_2, \quad (3.1.4)$$

Извещение о пожаре формируется устройством обнаружения в случае, если выполняется неравенство:

$$F > F_{\text{пор}}. \quad (3.1.5)$$

Вероятность ложного срабатывания (неправильного обнаружения) в этом случае будет определяться выражением:

$$P_{\text{лс}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{F_{\text{пор}} - m_1}{\sigma} \right) \right], \quad (3.1.6)$$

где $\Phi \left(\frac{F_{\text{пор}} - m_1}{\sigma_1} \right) = \Phi(Z)$ – есть функция Лапласа.

$$\Phi \left(\frac{F_{\text{пор}} - m_1}{\sigma_1} \right) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_0^{F_{\text{пор}}} \exp \left(-\frac{Z^2}{2} \right) dZ. \quad (3.1.7)$$

Аналогично могут быть определена вероятность пропуска пожара (не обнаружения):

$$P_{\text{но}} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{F_{\text{пор}} - m_2}{\sigma_2} \right) \right]. \quad (3.1.8)$$

Таким образом, вероятность ошибки обнаружения $P_{\text{ош}}$ пожара будет:

$$P_{\text{ош}} = \frac{P_{\text{но}} + P_{\text{лс}}}{2} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{m_2 - m_1}{\sigma_1 + \sigma_2} \right) \right]. \quad (3.1.9)$$

Из выражения (3.1.9) следует, что критерием минимизации вероятности ошибки будет достижение максимального значения отношения:

$$\frac{|m_2 - m_1|}{\sigma_1 + \sigma_2} \rightarrow \max. \quad (3.1.10)$$

На практике события появления сигналов помехи и пожара не являются равновероятными. Кроме того, дисперсии помехи и признака пожара для конкретного объекта априорно неизвестны. Поэтому в нормативных документах требования выбора порогов срабатывания пожарных извещателей учитывают максимально возможную величину дисперсии контролируемого признака [3.5].

Иллюстрация такого метода выбора решающего правила на примере теплового извещателя приведена на рис. 3.2. Из рисунка следует, что для фиксированного порога срабатывания извещателя, выбранного в соответствии с нормативными документами, вероятность ложного срабатывания, вычисленная по формуле (3.1.6), будет тем меньше, чем меньше значение $m_1 = T_{\text{норм}}$ и чем меньше значение σ_1 . С другой стороны, при фиксированном минимальном значении вероятности ложного срабатывания возможно уменьшение (стабилизация) времени обнаружения пожара путем регулирования значения порога на основе данных об исходном значении контролируемого параметра [3.4].

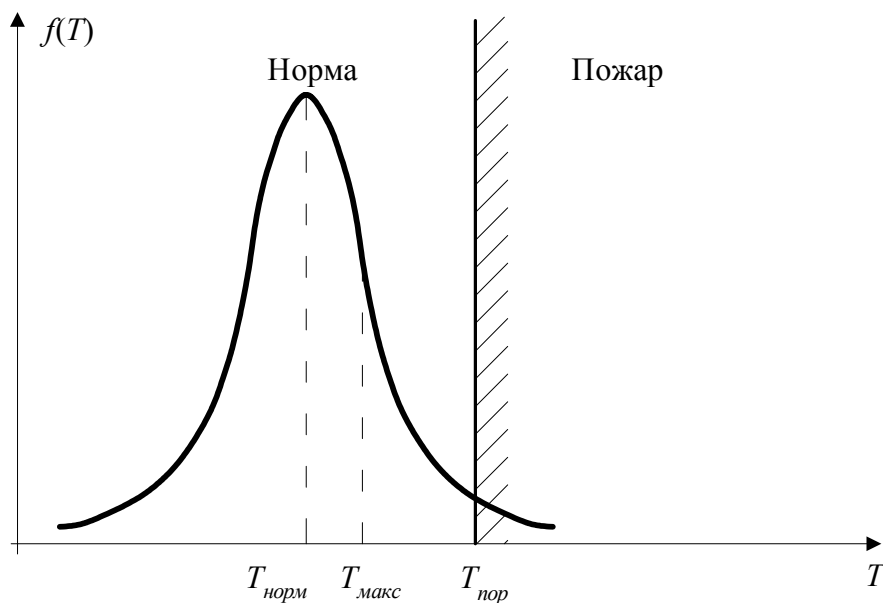


Рис. 3.2. Метод выбора решающего правила на примере теплового извещателя

Кроме рассмотренных выше направлений совершенствования методов обработки сигналов и принятия решения о пожаре, перспективным является совершенствование конструкции чувствительного элемента, а также применение новых материалов для его изготовления [3.6]. Положительный эффект, который при этом может быть достигнут, заключается в разработке извещателей, успешно функционирующих в неблагоприятных условиях — при воздействии высокой влажности, агрессивных средах и взрывоопасных зонах.

3.2. Тепловой пожарный извещатель с повышенной стабильностью инерционности срабатывания

Одним из наиболее распространенных в недавнем прошлом являлся тепловой пожарный извещатель, содержащий термочувствительный элемент в виде системы из кольцевых постоянных магнитов, имеющих точку Кюри вблизи $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, с установленными между ними металлическими теплоприемниками, и формирователь извещения о пожаре в виде герметичного магнитоуправляемого электрического контакта.

При работе извещатель включается последовательно в двухпроводную электрическую цепь (шлейф сигнализации), его нормально замкнутое состояние свидетельствует об отсутствии пожара на контролируемом объекте. Температура окружающего воздуха, равная точке Кюри, является пороговой температурой срабатывания теплового извещателя, при которой постоянно замкнутый магнитоуправляемый электрический контакт размыкается.

Недостатком данного теплового извещателя является значительная инерционность срабатывания, вызванная значительной тепловой инерционностью его термочувствительного элемента. При скорости нарастания $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и менее пороговая температура максимальна и практически не изменяется. При большей скорости нарастания температуры (более $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) время срабатывания (инерционность) несколько уменьшается, но все равно остается значительным. Например, для описанного извещателя при скачкообразном изменении температуры она составляет по нормам пожарной безопасности до 120 с, а при скорости нарастания температуры среды $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ для извещателей этого типа может увеличиться до 2420 с.

Кроме этого, для пороговых тепловых извещателей характерна низкая стабильность их инерционности при различных исходных (средних) значениях температуры окружающей среды. В процессе эксплуатации средняя температура в месте установки извещателя может медленно изменяться в значительных пределах. Так, возможно медленное снижение температуры относительно условно нормальной (например, зимой в ночное время при отключении отопления), что приводит к значительному увеличению разницы между исходной (средней) температурой среды и пороговой температурой. Это существенно увеличивает время срабатывания извещателя при возникновении пожара.

Возможно также увеличение исходной (средней) температуры окружающей среды и приближение к порогу срабатывания извещателя в жаркий летний день, например, под воздействием солнечного освещения, при работе теплоустановок и т.п. Это может привести к ложным срабатываниям извещателя при относительно кратковременных флуктуациях темпера-

туры среды в месте установки при отсутствии тепловых воздействий от пожара.

Именно поэтому, на наш взгляд, в нормативной литературе не рекомендуют применять максимальные тепловые извещатели на объектах, где возможно значительное понижение температуры в месте установки извещателя или его нагрев под действием солнечного и другого теплового излучения.

Частично указанные недостатки устранены в тепловых максимально-дифференциальных извещателях. В качестве термочувствительных элементов в таких извещателях обычно используются малогабаритные полупроводниковые терморезисторы, имеющие небольшую тепловую инерционность. В них извещение о пожаре для повышенной скорости нарастания температуры среды формируется при меньшей температуре, чем для медленного изменения температуры среды и, соответственно, за меньшее время.

В тепловых максимально-дифференциальных извещателях значение скорости нарастания температуры, при которой наблюдается эффективное уменьшение времени срабатывания, как правило, установлено не менее 6-8 °C/мин. Поэтому при пожарах, для которых скорость нарастания температуры имеет меньшее значение, извещатель работает только как максимальный с отмеченной выше недостаточной стабильностью инерционности при отклонениях рабочей температуры среды.

Стабилизация инерционности теплового извещателя может быть достигнута за счет адаптации температуры срабатывания при медленном изменении температуры окружающей среды в отсутствие пожара [3.13]. Для этого должна быть введена дополнительная зависимость величины порога срабатывания от значения средней (исходной) температуры окружающей среды.

Функциональная схема разработанного теплового пожарного извещателя изображена на рис. 3.3. Тепловой извещатель работает следующим образом. Три термочувствительных элемента, выполненные на терморезисторах, из-за создаваемых различных условий теплопередачи имеют различную постоянную времени изменения сопротивления при изменении температуры (тепловую инерционность). Первый термочувствительный элемент 1 имеет минимальную тепловую инерционность. Второй термочувствительный элемент 2 имеет тепловую инерционность больше, чем первый. Третий термочувствительный элемент 3 имеет тепловую инерционность гораздо больше, чем первый 1 и второй 2 термочувствительные элементы. Иллюстрирующие данную особенность графики изменения напряжений, поступающих на входы компаратора при изменении температуры контролируемой среды с разной скоростью, приведены на рис. 3.4.

При эксплуатации извещатель подключается к шлейфу сигнализации приемно-контрольного прибора. При медленном, менее $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, повышении температуры окружающего воздуха (рис. 3.4 а), как правило, не связанного с пожаром, сопротивления терморезисторов первого 1, второго 2 и третьего 3 термочувствительных элементов пропорционально уменьшаются.

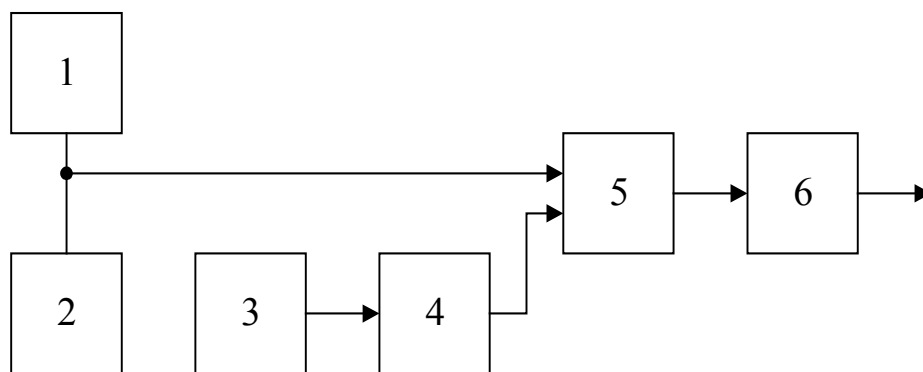


Рис. 3.3. Функциональная схема теплового пожарного извещателя:

- | | |
|---|--|
| 1 – первый термочувствительный элемент; | 4 – формирователь опорного напряжения; |
| 2 – второй термочувствительный элемент; | 5 – компаратор напряжения; |
| 3 – третий термочувствительный элемент; | 6 – формирователь извещения о пожаре |

При этом напряжение $U_{\text{вх1}}$ на первом измерительном входе компаратора 5 по отношению к напряжению на втором его входе $U_{\text{вх2}}$ изменяется незначительно, таким образом, что сохраняется разность напряжений, достаточная для обеспечения требуемого уровня помехозащищенности при флуктуациях теплового шума и других помех. Параметры сопротивлений термочувствительных элементов выбраны таким образом, что при дальнейшем медленном росте температуры среды (при возможном очень медленном развитии пожара) напряжение $U_{\text{вх1}}$ на первом входе компаратора 5 (при $t_{\text{сп1}}$) достигает и начинает превышать пороговое напряжение на втором его входе $U_{\text{вх2}}$. При этом на выходе компаратора 5 появляется управляющий сигнал, вызывающий формирование блоком 6 в шлейф сигнализации извещения о пожаре.

При более быстром росте температуры в помещении (рис. 3.4 б) примерно $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, что свидетельствует о вероятном появлении пожара, напряжение на втором входе компаратора 5 растет незначительно. Поэтому напряжение на первом входе компаратора 5 при меньшей температуре, чем $t_{\text{сраб}}$ (на рис. 3.4 а) достигает напряжения на втором его входе:

$$t_{\text{сраб1}} < t_{\text{сраб2}} < t_{\text{сраб}}. \quad (3.2.1)$$

При этом порог срабатывания $U_{\text{вх}2}$ будет тем меньше, чем меньше была исходная температура, с которой начался относительно быстрый рост температуры среды:

$$U_{\text{вх}2}(t_{\text{раб.min}}) < U_{\text{вх}2}(t_{\text{раб}}). \quad (3.2.2)$$

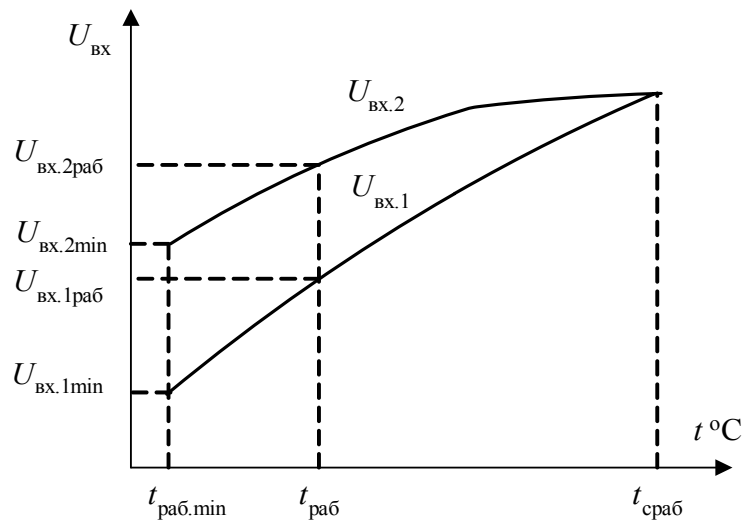
Таким образом, адаптация порогового напряжения на втором входе компаратора обеспечивает уменьшение времени обнаружения пожара при исходной низкой температуре среды, приближая это время к времени обнаружения при высокой исходной температуре в диапазоне рабочих температур.

При быстром росте температуры в помещении (рис. 3.4 в), со скоростью более 5 °С/мин, что свидетельствует о появлении быстроразвивающегося пожара, напряжение $U_{\text{вх}2}$ на втором входе компаратора 5 практически не изменяется. Напряжение $U_{\text{вх}1}$ на первом входе компаратора 5 из-за мало изменяющегося сопротивления второго термочувствительного элемента (из-за его тепловой инерционности гораздо большей, чем первого термочувствительного элемента) возрастает относительно более быстро, чем в предыдущем случае. Поэтому напряжение $U_{\text{вх}1}$ на первом входе компаратора 5 достигнет напряжения $U_{\text{вх}2}$ на втором его входе при меньшей температуре, чем в ранее рассмотренном случае:

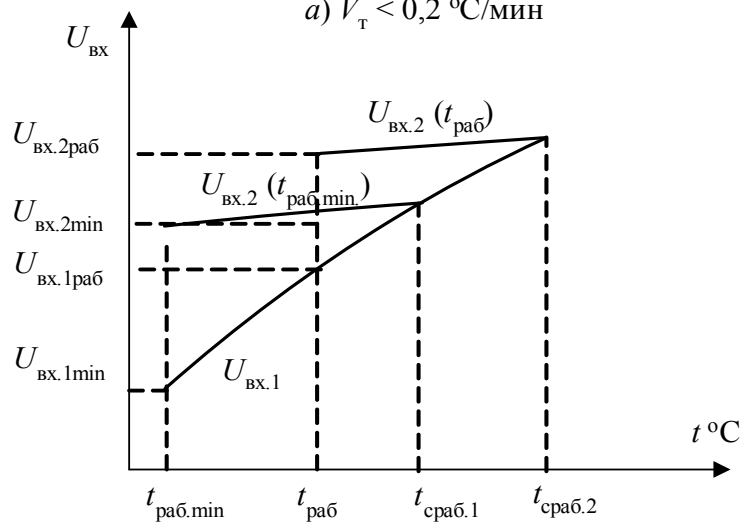
$$t_{\text{сраб}3} < t_{\text{сраб}1}; \quad t_{\text{сраб}4} < t_{\text{сраб}}. \quad (3.2.3)$$

Однако при этом в случае, если быстрый рост температуры, связанный с пожаром, начался при низкой температуре ($t_{\text{раб.min}} < t_{\text{раб}}$), то вследствие более низкого положения напряжения порога ($U_{\text{вх}2}(t_{\text{раб.min}}) < U_{\text{вх}2}(t_{\text{раб}})$) срабатывание разработанного извещателя произойдет значительно раньше, чем аналогичных рассмотренных ранее извещателей. Следовательно, адаптация порогового напряжения на втором входе компаратора 5 обеспечивает и в этом случае уменьшение времени обнаружения пожара относительно аналогичных извещателей. При этом инерционность теплового извещателя практически не будет зависеть от исходной температуры (с которой начался пожар) во всем диапазоне рабочих температур.

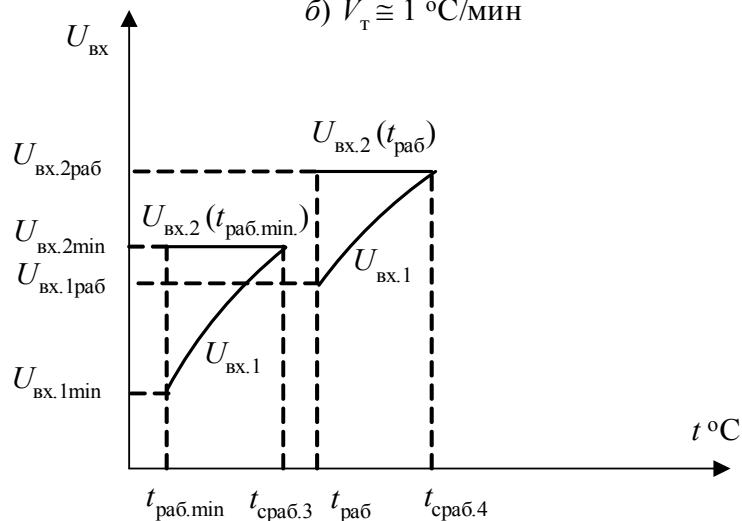
Таким образом, в разработанном извещателе достигается стабилизация инерционности при изменении температуры окружающей среды в значительных пределах.



а) $V_T < 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$



б) $V_T \approx 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$



в) $V_T > 5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$

Рис. 3.4. Временные зависимости напряжений на входах компаратора от температуры контролируемой среды при различной скорости ее изменения

3.3. Физические основы создания тонкопленочных чувствительных элементов пожарных извещателей

Как отмечалось выше, для значительного числа вариантов применения тепловых извещателей ограничивающими факторами являются их значительная тепловая инерционность а также существенное влияние на их конструктивные элементы отрицательных факторов внешней среды.

Термоиндикаторные покрытия могут применяться в широком диапазоне температур, в условиях повышенной влажности и агрессивной среды, они не подвержены влиянию статического электричества, токов высокой частоты, их можно наносить на поверхность изделия, находящегося под напряжением любой величины. Инерционность таких термоиндикаторов находится в пределах от сотых долей секунды до нескольких секунд. При этом они относительно дешевы и доступны [3.7, 3.11].

Для расширения области и условий применения могут быть использованы новые конструкционные материалы – термоизоляционные покрытия, световоды, различные полупроводниковые термоэлементы.

Волоконно-оптические световоды, покрытые защитной оболочкой, могут использоваться как во влажной, так и в агрессивной средах.

В полупроводниковых термоэлементах, в отличие от металлических, термоэлектродвижущая сила значительно больше, и может достигать сотен мВ/°С, что позволяет их использовать без предварительного усиления. Постоянная времени пленочных термоэлементов может составлять несколько сотых долей секунды. Стоимость полупроводниковых пленочных термоэлементов ниже металлических.

Рассмотрим результаты исследования и разработки тепловых пожарных извещателей, в чувствительных элементах которых используются термоиндикаторные покрытия и полупроводниковые термоэлементы.

3.3.1. Метод определения тепловой инерционности термпокрытия

Параметры чувствительных элементов тепловых пожарных извещателей зависит от многих факторов и в первую очередь от теплофизических характеристик покрытия. Такими характеристиками являются коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость c и производные от них - коэффициент температуропроводности a и тепловая активность материала b .

Коэффициент a определяется по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (3.3.1)$$

а величина b – по формуле

$$b = \sqrt{\lambda c \rho}, \quad (3.3.2)$$

где ρ – плотность вещества.

Различие теплофизических характеристик объекта измерения и термоиндикаторного покрытия приводит к тому, что при измерении температуры термоиндикаторами необходимо учитывать:

- 1) динамическую погрешность, обусловленную тепловой инерционностью;
- 2) погрешность, вызванную искажающим влиянием термопокрытия на температурное поле окружающей среды;
- 3) погрешность, вызванную участием термоиндикаторного покрытия в теплообмене излучением.

Динамическая погрешность возникает за счет собственной теплоемкости термодатчика при измерениях в нестационарном режиме, т.е. она определяется главным образом различием коэффициентов удельной теплоемкости окружающей среды и термоиндикаторного покрытия.

Установка датчика температуры, в том числе и термопокрытия, влечет за собой изменение температурного поля вследствие нарушения однородности окружающей среды и перераспределения тепла. В связи с этим датчик фиксирует температуру, отличную от той, которая была до его установки. Разность этих температур составляет погрешность, вызванную искажающим влиянием термопокрытия на температурное поле окружающей среды, для расчета которой необходимо знать коэффициенты тепло- и температуропроводности термопокрытия. Если нагрев термопокрытия осуществляется преимущественно излучением, то погрешность образуется из-за различия коэффициентов поглощения термочувствительного покрытия и окружающей среды и термоиндикатор может фиксировать температуры, значительно отличающуюся от температуры прилегающей среды. При относительно невысоких температурах влияние лучеиспускания не значительно, при температурах выше 500 °С это влияние резко возрастает. Учитывая, что температура срабатывания чувствительных элементов ТПИ, как правило не превышает 100 °С, погрешностью из-за различия коэффициентов поглощения можно пренебречь.

Несмотря на наличие различных методов, разработанных для исследования теплофизических характеристик различных материалов, общность их состоит в том, что все они основаны на решении дифференциального уравнения теплопроводности при определенных начальных и граничных условиях

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (3.3.3)$$

где T – температура; τ – время; α – коэффициент температуропроводности; ∇ – оператор Лапласа, представленный в соответствующей системе коор-

динат; q_v – удельная мощность объемного источника тепла.

Это уравнение, справедливое для веществ, теплофизические характеристики которых не зависят от температуры, устанавливает связь между временными и пространственными изменениями в теле под действием источника тепла. Поскольку температурное поле тела зависит от его свойств, то по найденному изменению температуры в одной или нескольких точках исследуемого тела можно вычислить коэффициенты тепло- или теплопроводности. В связи с тем, что решение дифференциальных уравнений теплопроводности второго порядка представляет собой сложные функциональные зависимости, при разработке практических методов используются несложные решения, в частности для одномерных тепловых потоков при тех начальных и граничных условиях, которые можно реализовать в теплофизическом эксперименте.

Известно, что если тело поместить в среду с постоянной температурой то изменение температуры тела во времени включает три стадии - начальную (иррегулярную), регулярную, в том числе монотонный разогрев (или охлаждение), и стационарную. При наличии в теле источника тепла расчет теплофизических коэффициентов может быть проведен на любом участке температурной кривой, необходимо только выбрать тот участок, который позволяет наиболее эффективно и рационально решить задачу, связанную с измерением теплофизических характеристик в требуемом интервале температур для конкретных материалов

Все известные методы определения теплофизических характеристик материалов можно разделить на три группы: стационарные, нестационарные и квазистационарные. Достоинством нестационарных и квазистационарных методов является возможность определения по данным одного непродолжительного опыта коэффициентов тепло- и теплопроводности самых разнообразных материалов, а в квазистационарном режиме - температурную зависимость этих величин.

Стационарные методы находят достаточно широкое применение при высокотемпературных исследованиях теплофизических характеристик. В стационарных методах тепловой поток, проходящий через тело или систему тел, остается постоянным по величине и направлению, т.е. находятся частные решения уравнения теплопроводности (3.3.3) при условии, что температурное поле будет стационарным ($\partial T / \partial \tau = 0$). В этом случае используется закон Фурье в виде:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \text{const} . \quad (3.3.4)$$

и дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial z^2} = 0. \quad (3.3.5)$$

Уравнения (3.3.4) и (3.3.5) не имеют общего решения. Частные решения получены применительно к телам определенной геометрической формы при конкретно заданных условиях однозначности. Эти решения для одномерного теплового потока позволяют вычислить коэффициент теплопроводности из соотношения

$$\lambda = \frac{Q}{T_1 - T_2} K. \quad (3.3.6)$$

где Q – тепловой поток через поверхность, Вт; K – коэффициент формы исследуемого материала, м^{-1} .

Для бесконечно плоского, цилиндрического и шаровых слоев коэффициенты форм можно определить соответственно из следующих соотношений:

$$K_{\text{п}} = \frac{\delta}{F}; \quad (3.3.7)$$

$$K_{\text{ц}} = \ln \frac{d_2}{2d_1\pi l}; \quad (3.3.8)$$

$$K_{\text{ш}} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right), \quad (3.3.9)$$

где δ – толщина плоского слоя; F – поверхность слоя, нормальная к направлению теплового потока; l – длина цилиндрического слоя; d_1, d_2 – внутренний и внешний диаметры цилиндрического и шарового слоев исследуемого материала.

В зависимости от геометрических форм образца поле температур может быть различным. Методы с использованием плоских изотерм, когда тепловой поток направлен вдоль оси симметрии, называются методами с осевыми или продольными потоками тепла. Цилиндрические изотермы соответствуют распределению теплового потока по направлению радиуса цилиндрического образца, при этом используются методы, связанные с радиальным потоком тепла. Сферические изотермы возникают при распространении теплового потока по радиусу сферического образца.

Из выражения (3.3.6) следует, что для определения коэффициента теплопроводности необходимо измерить тепловой поток Q , проходящий через исследуемый образец заданных размеров, и перепад температур $T_1 - T_2$ на обеих его изометрических поверхностях. Выражение (3.3.6) по-

лучено в предположении, что λ является величиной постоянной, не зависящей от температуры. Поэтому температурный перепад в слое исследуемого вещества должен быть незначительным (несколько градусов) и истинное значение коэффициента теплопроводности можно считать средним для данного интервала температур.

Стационарные методы определения коэффициента теплопроводности по характеру измерений делятся на абсолютные и относительные. В абсолютных методах измеренные в эксперименте параметры дают возможность из расчетной формулы (3.3.6) получить коэффициент теплопроводности. В относительных методах измеряемых параметров для расчета λ оказывается недостаточно. В этом случае используется метод сравнения коэффициента теплопроводности исследуемого материала с эталонным материалом, тепловые свойства которого известны. При этом в расчетную формулу входит λ эталона. Относительные методы имеют определенные преимущества перед абсолютными, так как более простые.

Нестационарные методы

В методах исследования теплофизических характеристик при нестационарном тепловом потоке используются частные решения уравнения теплопроводности (3.3.3) при условии $\partial T / \partial \tau \neq 0$, которое в этом случае можно записать как

$$\frac{\partial q}{\partial \tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}; \quad (3.3.10)$$

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (3.3.11)$$

Решение этих уравнений, как и в случае стационарного теплового режима, приобретает простой вид для тел правильной геометрической формы и определенных краевых условий. При этом имеется возможность установить характер зависимости температурного поля от времени в различных стадиях развития теплового процесса. В зависимости от того какая стадия используется для определения теплофизических характеристик материала, нестационарные методы подразделяют на методы начальной стадии теплообмена (чисто нестационарные или иррегулярные) и методы регулярного режима.

Характерной особенностью методов начальной стадии развития теплового процесса является существенное влияние на расчетные формулы начальных условий (число Фурье $F_0 = a \tau / \delta^2 < 0,5$). В чисто нестационарных методах температурные поля имеют сложную зависимость от физических свойств тела, геометрических размеров, граничных и начальных условий.

По характеру нагрева эти методы можно разделить на импульсные, где возникают какие-либо источники тепла, и контактные, где осуществляется тепловой контакт с телами, находящимися при постоянной температуре.

При помощи методов, основанных на решении уравнений нестационарного поля температур, возможно комплексное определение теплофизических характеристик. Применение этих методов, позволяет из данных одного непродолжительного (менее 1 мин для тонкослойных веществ) эксперимента определить тепло- и температуропроводность, что представляется перспективным для исследования тонкопленочных термоиндикаторных покрытий. Достаточно простым и эффективным импульсный метод. В случае, когда задача сводится к одномерной, решение дифференциального уравнения (3.3.3) для неограниченной среды при действии мгновенного источника тепла Q_0 записывается в виде

$$T(R, \tau) = \frac{Q_0}{(2\sqrt{\pi a \tau})^n} \left[\exp\left(-\frac{R^2}{4a\tau}\right) \right], \quad (3.3.12)$$

где $n = 1, 2, 3$ соответственно для плоского, линейного и точечного источников; R - толщина слоя покрытия; при начальных условиях $T(R, 0) = 0$.

В любой точке раздела системы покрытие – подложка через некоторое время $\tau_{\max}$ температура достигнет максимального значения, что позволяет, приравнявая производную температуры по времени к нулю, получить:

$$a = \frac{R^2}{2\pi\tau_{\max}}. \quad (3.3.13)$$

Для оценки инерционности ТПИ с чувствительным элементом на основе термоиндикаторного покрытия необходимо определить инерционность термоиндикаторной пленки нанесенной на подложку.

Для расчета можно воспользоваться общеизвестным методом электротепловой аналогии. Процесс теплопроводности внутри плоского тела описывается уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (3.3.14)$$

При помощи уравнения Лапласа описывается и ряд других процессов, в частности распределения электрического потенциала в проводнике:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0. \quad (3.3.15)$$

Аналогия между дифференциальными уравнениями, описывающими процессы различной физической природы позволяет формально одинаково их решать, что дает возможность изучать процесс теплопроводности на электрической модели. Если модель и образец удовлетворяют всем требованиям аналогии, то измерив распределение электрического потенциала модели и подставив результаты в безразмерной форме, можно рассматривать найденное поле U как поле T .

Исходное дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3.3.16)$$

описывающее температурное поле в исследуемом элементе, можно аппроксимировать неявным конечно-разностным уравнением

$$\frac{T_{n,m} - T_{n,m-1}}{\Delta \tau} = a \frac{T_{n-1,m} - 2T_{n,m} + T_{n+1,m}}{\Delta x^2}, \quad (3.3.17)$$

где $T_{n,m}$ – температура в точке n в момент времени m ; $T_{n,m-1}$ – температура в точке n в предыдущий момент времени ($m - 1$); $T_{n-1,m}$ – температура в точке $n - 1$ (слева от точки n) в момент времени m ; $T_{n+1,m}$ – температура в точке $n + 1$ (справа от точки n) в момент времени m ; $\Delta \tau$ – интервал разбишки времени рассчитываемого процесса на дискретные участки; Δx – интервал разбишки линейного размера рассчитываемого элемента на дискретные участки; a – коэффициент температуропроводности исследуемого материала.

Конечно-разностному уравнению можно поставить в соответствие уравнение Кирхгофа для суммы электрических токов в узле активных сопротивлений

$$\frac{U_{n-1,m} - U_{n,m}}{R_x} + \frac{U_{n+1,m} - U_{n,m}}{R_x} + \frac{U_{n,m-1} - U_{n,m}}{R_o} = 0. \quad (3.3.18)$$

После преобразования получаем:

$$\frac{U_{n,m} - U_{n,m-1}}{R_o} = \frac{U_{n-1,m} - 2U_{n,m} + U_{n+1,m}}{R_x}. \quad (3.3.19)$$

Сравнивая уравнения (3.3.17) и (3.3.19) можно убедиться, что электрический потенциал U аналогичен температуре T .

В уравнениях (3.3.18) и (3.3.19) приняты следующие обозначения:

R_x – активное электрическое сопротивление, моделирующее тепловое сопротивление дискретного участка Δx ;

R_o – активное электрическое сопротивление, моделирующее теплоем-

кость дискретного участка Δx ;

$U_{n,m}$ – электрический потенциал в узле, объединяющем три активных сопротивления: R_x , R_α и R_o ;

$U_{n,m-1}$ – электрический потенциал на свободном конце сопротивления R_o ;

$U_{n-1,m}$ – электрический потенциал на свободном конце одного сопротивления R_x ;

$U_{n+1,m}$ – электрический потенциал на свободном конце второго сопротивления.

Переходя к относительным температурам $\theta_i = T_i/T_{\text{макс}}$ и относительным потенциалам $\theta_i = U_i/U_{\text{макс}}$, устанавливаем связь между теплофизическими параметрами рассматриваемых материалов, тепловыми граничными условиями и активными электрическими сопротивлениями:

$$R_x = \frac{\Delta x}{\lambda} K; \quad (3.3.20)$$

$$R_o = \frac{\Delta \tau}{c\rho \Delta x} K; \quad (3.3.21)$$

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha} K; \quad (3.3.22)$$

$$R_\pi = \frac{\theta_{\text{ср}} - \theta_{n,m}}{\varepsilon \sigma T_{\text{макс}}^3 (\theta_{\text{ср}}^4 - \theta_{n,m}^4)}. \quad (3.3.23)$$

где K – нормирующий множитель для всех сопротивлений модели; R_α – активное электрическое сопротивление, моделирующее конвективное тепловое сопротивление на границе рассматриваемого элемента; α – коэффициент теплоотдачи; R_π – активное электрическое сопротивление, моделирующее теплообмен излучением на границе рассматриваемого элемента; ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана; $T_{\text{макс}}$ – максимальная температура; $\theta_{\text{ср}}$ – относительная температура среды с которой происходит теплообмен,

$$\theta_{\text{ср}} = T_{\text{ср}}/T_{\text{макс}}. \quad (3.3.24)$$

Для определения динамической погрешности термоиндикаторов рассмотрим картину нагрева подложки с нанесенным на нее слоем термопокрытия и без него (рис 3.5, 3.6). Разобьем слои термопокрытия и подложки на четыре дискретных участка (точки 0 - 4 и 0 - 8). Термическое сопротивление каждого участка заменим активным сопротивлением R_{x1} , а его теплоемкость - активным сопротивлением R_{o1} . Граничные условия задаются сопротивлениями R_α и R_π . Влиянием термопокрытий на лучистый те-

плообмен можно пренебречь, так как в инфракрасной области спектра они являются частично прозрачными и не "затемняют" подложку от теплового излучения. Поэтому для данного расчета принимаем $R_{\pi} = 0$.

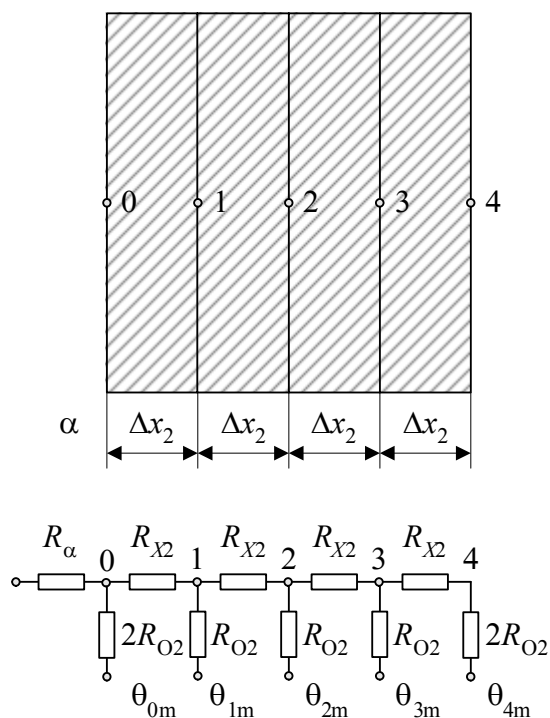


Рис. 3.5. Элемент подложки без нанесённого слоя термоиндикатора и его электрическая модель

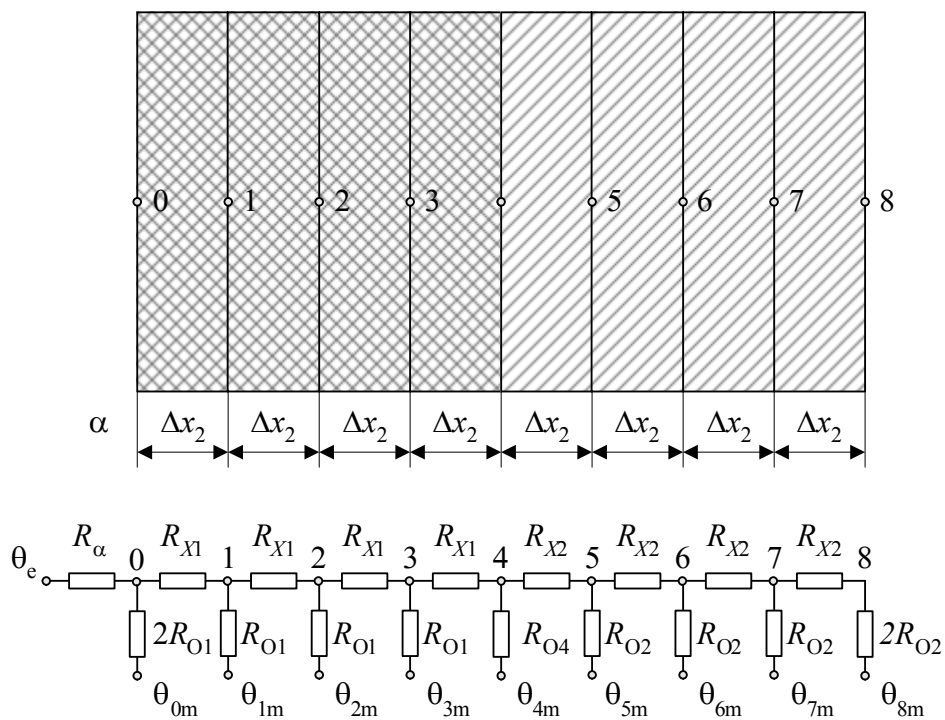


Рис. 3.6. Элемент подложки с нанесённым слоем термоиндикатора и его электрическая модель

Пример расчета тепловой инерционности термопокрытия

В качестве термопокрытия рассмотрим термоиндикаторную краску плавления серии ТИ. Так как точность измерения температуры такого термопокрытия составляет $\pm 1^\circ\text{C}$, решение задачи будем проводить для интервала температур 2°C , т.е. $T_{\text{мин}} = (T_{\text{кр}} - 1)$ и $T_{\text{макс}} = (T_{\text{кр}} + 1)$. Для измерения относительных потенциалов θ_i в различных точках модели воспользуемся цифровым потенциометром.

Расчет динамической погрешности проведем для термоиндикаторной краски плавления ТИ - 75, нанесенной на подложку из алюминия. Толщина термопокрытия $\delta_1 = 0,02$ мм; толщина подложки $\delta_2 = 0,4$ мм. Расчет проведем при температуре $T = (T_{\text{кр}} + 1)^\circ\text{C}$.

Характеристики термопокрытия и подложки следующие:

Термопокрытие	Подложка
$\rho_1 = 1445 \text{ кг/м}^3$;	$\rho_2 = 2700 \text{ кг/м}^3$;
$\lambda_1 = 0,13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;	$\lambda_2 = 72,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
$c_1 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;	$c_2 = 0,468 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$;
$\Delta x_1 = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$;	$\Delta x_2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$;
$\Delta \tau = 0,1 \text{ с}$.	$\alpha = 116,3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Находим значение активных сопротивлений, с помощью которых устанавливаем тепловую картину рассматриваемого элемента.

$$R_{x1} = \frac{\Delta x_1}{\lambda_1} K = \frac{0,5 \cdot 10^{-5}}{0,13} K = 3,8 \cdot 10^{-5} K ; \quad (3.3.25)$$

$$R_{01} = \frac{\Delta \tau}{c_1 \rho_1 \Delta x_1} K = \frac{0,1}{1,3 \cdot 10^3 \cdot 1,34 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-5}} K = 2061 \cdot 10^{-5} K ; \quad (3.3.26)$$

$$R_{x2} = \frac{\Delta x_2}{\lambda_2} K = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{72,8} K = 0,068 \cdot 10^{-5} K ; \quad (3.3.27)$$

$$R_{02} = \frac{\Delta \tau}{c_2 \rho_2 \Delta x_2} K = \frac{0,1}{0,468 \cdot 10^3 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}} K = 15,82 \cdot 10^{-5} K ; \quad (3.3.28)$$

$$R_{04} = \frac{2R_{01}R_{02}}{R_{01} + R_{02}} K = \frac{2 \cdot 2061 \cdot 15,8}{2061 + 15,8} 10^{-5} K = 31,4 \cdot 10^{-5} K ; \quad (3.3.29)$$

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha} K = \frac{1}{100} K = 1000 \cdot 10^{-5} K . \quad (3.3.30)$$

Приняв $K = 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, получим $R_{x1} = 3,8 \text{ Ом}$; $R_{01} = 2061 \text{ Ом}$; $R_{x2} = 0,068 \text{ Ом}$; $R_{02} = 15,8 \text{ Ом}$; $R_\alpha = 1000 \text{ Ом}$; $R_{04} = 118,8 \text{ Ом}$.

Установив данные сопротивления согласно схеме, приведенной на рис. 3.6, можно найти рост температуры в точке 4 системы "термопокры-

тие – подложка" (в данном случае подложка металлическая).

Аналогично выполним расчет температуры для точки 0 (рис. 3.5) подложки без слоя термочувствительного покрытия. На основании полученных данных строим график роста температур чистой подложки и подложки, покрытой слоем термокраски. на рис. 3.7 построен график роста температуры на подложке из металла (алюминий) и график роста температуры на подложке, покрытой слоем термоиндикаторной краски плавления ТИ-75.

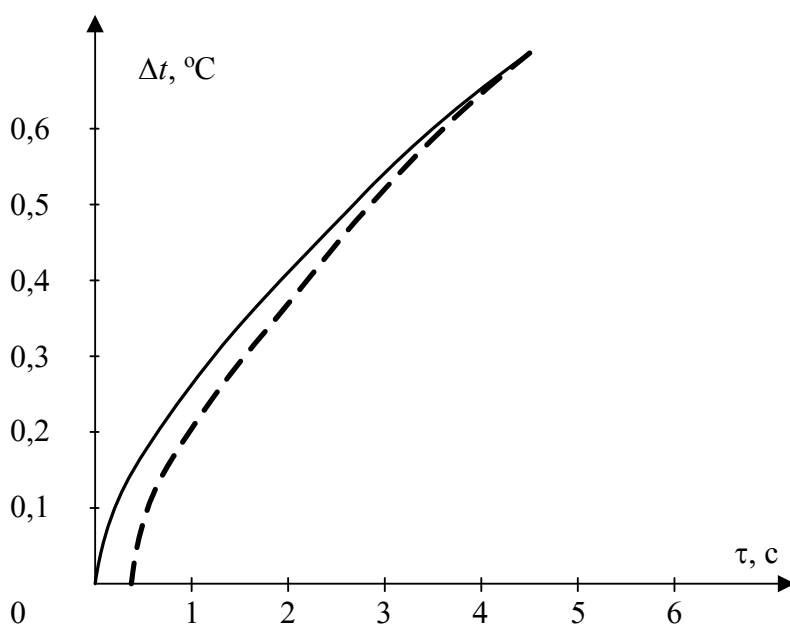


Рис. 3.7. Рост температуры Δt чистой подложки из металла и подложки из металла покрытого термоиндикаторной краской плавления толщиной $\delta_1 = 0,02$ мм:

— — — — — - металл;
 - - - - - - металл с термопокрытием

Из графиков видно, что максимальное время запаздывания нагрева подложки под покрытием составляет 0,4 с, что приводит к погрешности 0,2 °C.

На рис. 3.8 и 3.9 построены графики роста температуры аналогичные предыдущему, но при толщине термоиндикаторного покрытия $\delta_1 = 0,04$ мм и 0,06 мм соответственно.

На рис. 3.10 и 3.11 представлены графики роста температур чувствительного элемента, в котором подложка выполнена из стекла толщиной $\delta_2 = 0,5$ мм, а толщина термоиндикаторного покрытия $\delta_1 = 0,02$ и 0,06 мм.

На рис. 3.12 представлен график роста температуры чувствительного элемента в котором подложка выполнена из полиамидной пленки толщиной $\delta_2 = 0,18$ мм и толщина термоиндикаторного покрытия $\delta_1 = 0,04$ мм.

Из графиков видно, что термическое сопротивление пленок термоиндикатора незначительно. Эти графики и расчеты показывает, что термо-

индикаторное покрытие пригодно для измерения быстропротекающих процессов и может быть использовано в качестве чувствительного элемента в тепловых пожарных извещателях.

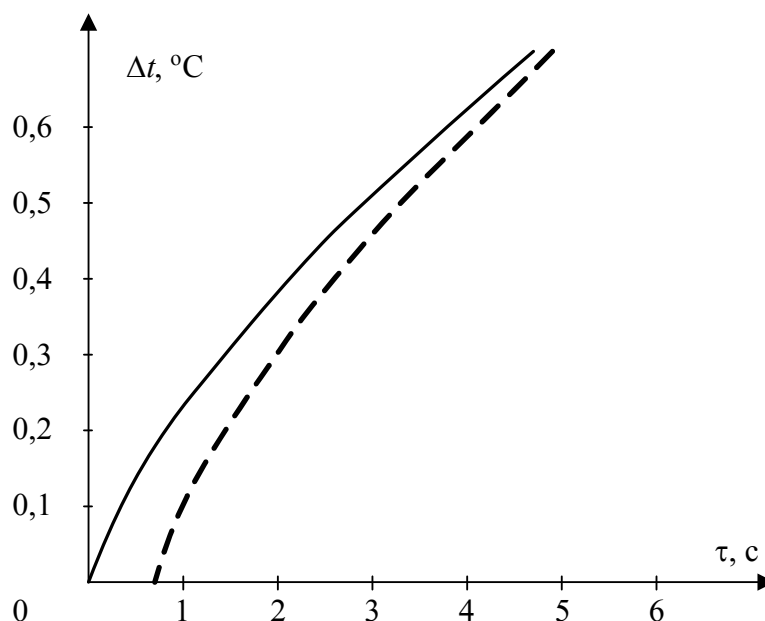


Рис. 3.8. Рост температуры Δt чистой подложки из металла и ложки из Металла, покрытого термоиндикаторной краской плавления толщиной $\delta_1 = 0,04$ мм:

— — — — — - металл;
 - - - - - - металл с термopокpытием

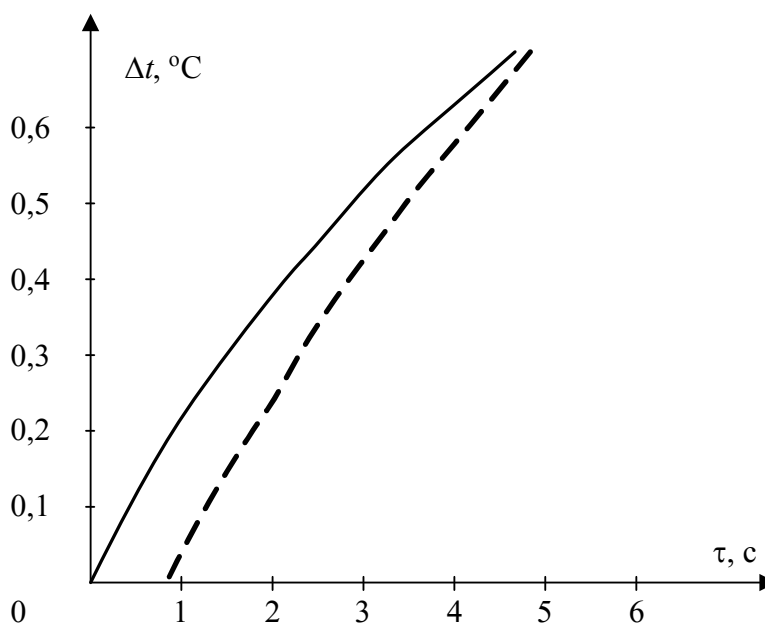


Рис. 3.9. Рост температуры Δt чистой подложки из металла и ложки из металла, покрытого термоиндикаторной краской плавления толщиной $\delta_1 = 0,06$ мм:

— — — — — - металл;
 - - - - - - металл с термopокpытием

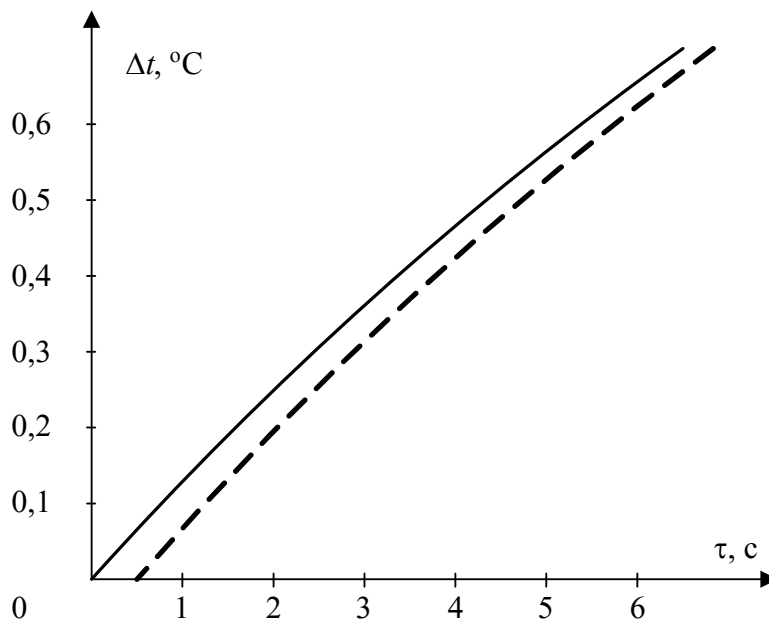


Рис. 3.10. Рост температуры Δt чистой подложки из стекла толщиной $\delta_2 = 0,5$ мм и полочки из стекла, покрытого термоиндикаторной краской плавления толщиной $\delta_1 = 0,02$ мм:

— - стекло;
 - - - - - стекло с термopокpытием

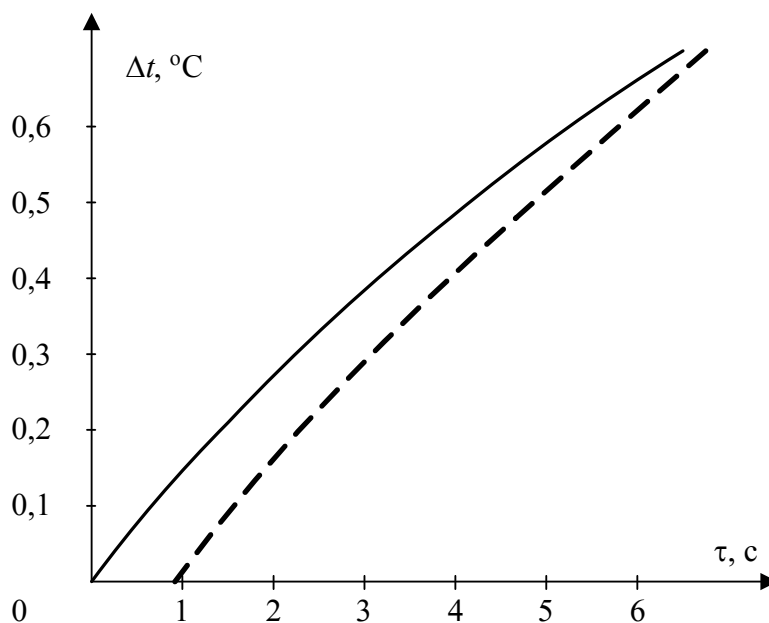


Рис. 3.11. Рост температуры Δt чистой подложки из стекла и полочки из стекла, покрытого термоиндикаторной краской плавления толщиной $\delta_1 = 0,06$ мм:

— - стекло;
 - - - - - стекло с термopокpытием

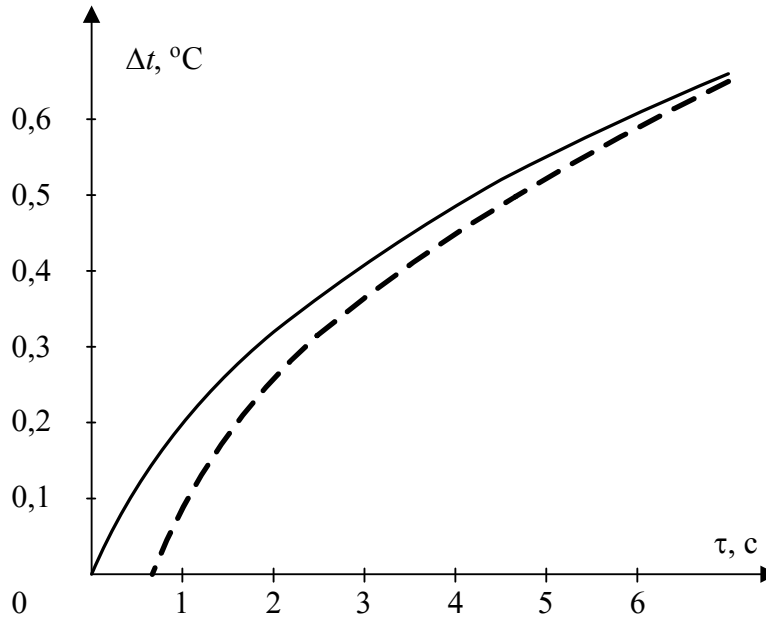


Рис. 3.12. Рост температуры Δt чистой подложки из полиамидной плёнки толщиной $\delta_2 = 0,18$ мм и подложки из полиамидной плёнки, покрытой термоиндикаторной краской плавления толщиной $\delta_1 = 0,04$ мм:

— плёнка;
 - - - плёнка с термопокрытием

3.3.2. Выходные параметры пленочного теплоприемника чувствительного элемента пожарного извещателя на основе халькогенидов висмута и сурьмы

Основные параметры приемников ИК-излучения включают в себя коэффициент преобразования (вольт - ваттная чувствительность) S , минимально обнаруживаемую мощность излучения $W_{\min}$, постоянную времени τ и др.

Универсальным критерием качества приемника является удельная или обнаружительная способность D^* , определяемая выражением

$$D^* = \frac{(A_1 \cdot \Delta f)^{1/2}}{W_{\min}}, \quad (3.3.31)$$

где A - площадь приемной части приемника; Δf - полоса пропускания.

С учетом теплового шума Джонсона, преобладающем в термоэлектрическом приемнике, имеет место следующее соотношение

$$D^* = \frac{\varepsilon \cdot \sqrt{A}}{2T \sqrt{K_0 \left[K_{из} + K_{пр} + \frac{R(K_{из} + K_{пр})}{\alpha^2 \cdot T} \right]^{1/2}}}, \quad (3.3.32)$$

где ε - излучательная способность чувствительного элемента; T - абсолютная температура; K_0 - постоянная Больцмана; $K_{из}$ и $K_{пр}$ - коэффициенты теплопередачи излучением и проводимостью; R - сопротивление датчика; α - коэффициент термо-ЭДС.

Кроме того, для термоэлектрических полупроводниковых материалов при комнатной температуре правомерны следующие зависимости:

$$\chi = \chi_e + \chi_\phi; \quad (3.3.33)$$

$$L = \chi_e / \sigma T; \quad (3.3.34)$$

$$\alpha = c - (K_0 / e) \ln \chi_e, \quad (3.3.35)$$

где χ , χ_e , χ_ϕ - коэффициент теплопроводности и его электронная и фоновая составляющие; L - число Лоренца; σ - удельная электропроводность; e - заряд электрона; c - постоянная для данного материала величина.

С учетом последних соотношений получаем следующую формулу для обнаружительной способности:

$$D^* = \frac{\varepsilon \sqrt{A}}{2T \sqrt{K_0 \left(\frac{S_{пп}}{e} \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{K_{из} l}{S_{пп}} + \chi_\phi + \chi_e + \frac{K_{из} l (S_{пп} + \chi_\phi + \chi_e)^2}{\chi_e (c - K_{пр} \ln \chi_e)^2} \right]^{1/2}}} \quad (3.3.36)$$

где l - длина ветвей термодатчика; $S_{пп}$ - площадь ветвей термодатчика.

Из формулы (3.3.36) видно, что D^* зависит от величины фоновой теплопроводности и требует оптимизации геометрических размеров p - и n -ветвей термоэлемента таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$\chi_p \sigma_p \left(\frac{S_p}{l_p} \right)^2 = \chi_n \sigma_n \left(\frac{S_n}{l_n} \right)^2, \quad (3.3.37)$$

где χ_p и χ_n - удельные теплопроводности; σ_p и σ_n - удельные электропроводности; l_p и l_n - длины термоветвей; S_p и S_n - сечения p - и n -термоветвей соответственно.

В этом случае при облучении немодулированным ИК-излучением

$$W_{\min}^2 = 4 K_0 T \Delta f n \left[G_c + G_r + \frac{(G_c + G_n)^2}{\varepsilon^2 Z T G_c} \right], \quad (3.3.38)$$

где G_c и G_r - коэффициенты отдачи одного термоэлемента, обусловленные теплопроводностью и излучением соответственно; Z - термоэлектрическая добротность элемента; n - количество элементов в батарее; T - температура, при которой находится приемник.

Для сведения шумов в приемнике к минимальному при сохранении высокой вольт-ваттной чувствительности S необходимо выполнить для G_c и G_r следующее соотношение:

$$G_c = \frac{G_r}{(1 + M)^{1/2}}, \quad (3.3.39)$$

где $M = \varepsilon^2 Z T$.

Это соотношение позволяет оптимизировать геометрические размеры ветвей термобатареи. В этом случае можно записать:

$$W_{\min}^2 = 4 K_0 T^2 \Delta f_n G_n N^2, \quad (3.3.40)$$

где N - коэффициент шума, имеющий вид:

$$N^2 = 1 + \frac{2}{M} + \frac{2}{M}(1 + M)^{1/2}. \quad (3.3.41)$$

Следовательно, чем выше Z , тем меньше N и ниже $W_{\min}$. В пленочных приемниках коэффициент теплоотдачи G_c обуславливается как тепловым потоком вдоль ветвей, так и потоком вдоль подложки, поэтому для учета полезного фактора вводят приведенный коэффициент теплопроводности:

$$x^1 = x \left(1 + \frac{x_{\text{подл}}}{x} \frac{d_{\text{подл}}}{d} \right), \quad (3.3.42)$$

где $x_{\text{подл}}$, x и $d_{\text{подл}}$, d - коэффициенты теплопроводности и толщина подложки и пленки соответственно.

Основной динамической характеристикой любого приемника излучения является постоянная времени τ . Если полагать, что в термодатчике τ определяется, в основном временем установления перепада температур ΔT в полупроводниковой термобатареи при условии постоянства теплового потока на границе и отсутствии теплообмена с поверхности, то можно записать

$$\tau = \frac{4}{\pi^2} \frac{c \gamma}{x} e^2, \quad (3.3.43)$$

где c - удельная теплоемкость; γ - удельный вес.

Для двухслойной системы полупроводник- подложка при условии $(c \gamma)_{\text{пп}} \cong (c \gamma)_{\text{подл}}$ имеет место соотношение

$$\gamma = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{c \gamma \left(1 + \frac{S_{\text{подл}}}{S_{\text{пп}}} \right)}{x_{\text{ф}}^{\text{пр}}}. \quad (3.3.44)$$

Из анализа приведенных соотношений рабочих характеристик приемника и электрофизических свойств материалов, используемых в пленочной микросхеме, следует, в качестве материала термоветвей n - и p -типа проводимости необходимо использовать высокоэффективные полупроводниковые материалы, удовлетворяющие требованию Z_{max} и обладающие оптимальными электрическими параметрами (α, G, n, u, x) .

Исследования выходных параметров пленочного теплоприемника данного типа проводилось по методикам РД 50 557 - 85, ТУ 50 209 - 80 на стендах СКБ Института Электроники Академии наук Республики Узбекистан.

Результаты испытаний показывают, что постоянная времени, чувствительных элементов, изменяется в пределах $(0,3 - 0,4)$ с. Вольт - ваттная чувствительность на воздухе для первых трех элементов, имеющих диаметр приемной площадки 6 мм, нечерненных, приблизительно одинаковы $S_p = 2,4$ В/Вт. Наличие чернения и уменьшение размеров приемной площадки (элементы № 4, 5) увеличивают S_p до 8 - 8,6 В/Вт, тогда как чувствительность по облученности снижается.

Испытания влияния длины волны падающего излучения на коэффициент преобразования $S_p(\lambda)$ график зависимости приведен на рис. 3.13. Испытания показали, что чувствительность нечерненных элементов зависит от длины волны λ и возрастает более чем в 2 раза при увеличении длины волны от 1 мкм до 7,45 мкм. При дальнейшем увеличении λ чувствительность несколько падает. Наличие чернящего покрытия АК - 243 снижает зависимость чувствительности элементов от длины волны падающего излучения. При $\lambda = 7,45$ мкм чувствительность увеличивается в 1,4 раза и при дальнейшем росте λ меняется незначительно. Зависимость $S(\lambda)$ видимо связана с оптическими свойствами полиамидной подложки, которая имеет сложный спектр пропускания ИК - излучения.

Испытания влияния температуры окружающей среды на вольт-ваттную чувствительность показали, что чувствительность уменьшается с ростом температуры. Причем температурный коэффициент чувствительности α элементов №4 и 5 с приемной площадкой 3 мм в 2 - 3 раза меньше, чем α элементов №1 - 3 с приемной площадкой 6 мм, график зависимости приведен на рис. 3.14.

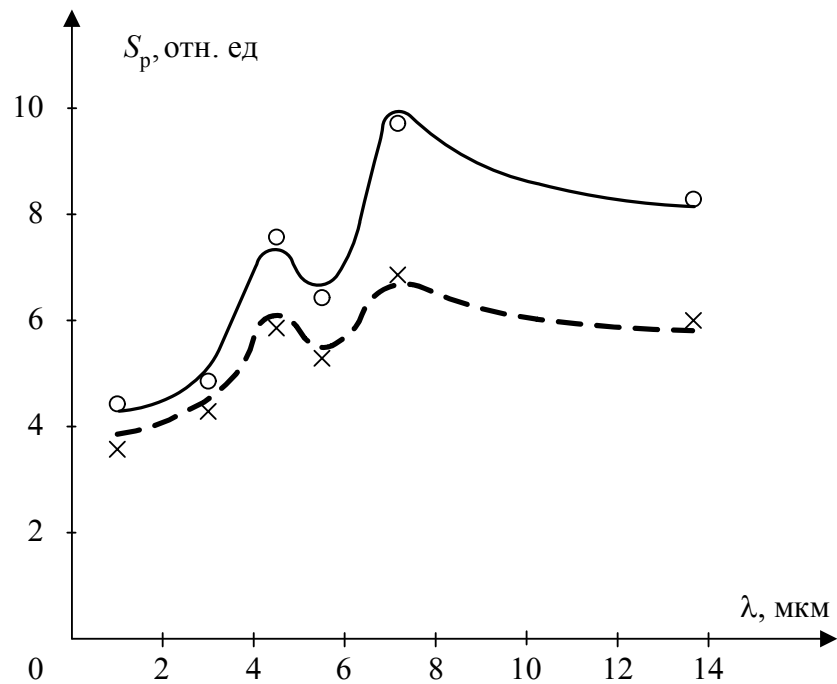


Рис. 3.13. Зависимость коэффициента преобразования от длины волны падающего излучения:

— - диаметр приёмной площадки 6 мм;
 --- - диаметр 3 мм

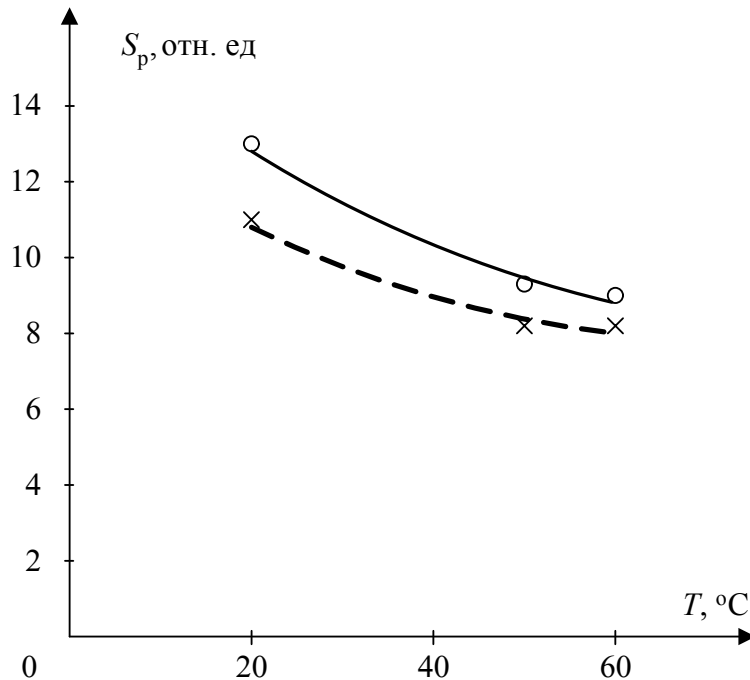


Рис. 3.14. Зависимости коэффициента преобразования от температуры среды:

— - диаметр приёмной площадки 6 мм;
 --- - диаметр 3 мм

На основании результатов полученных измерений рассчитаны пороговая чувствительность NEP и обнаружительная способность D^* , приемников ИК - излучения с топологией "Ромашка"; $NEP = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{1/2}$; $D^* = 8 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

3.3.3. Экспериментальное определение оптимальной толщины термоиндикаторного покрытия экрана теплового пожарного извещателя

На рис. 3.15 представлена структурная схема универсального стенда для исследования характеристик тепловых и дымовых пожарных извещателей.

На рис. 3.16 приведена схема оптического узла разработанного пожарного извещателя. На разработанную конструкцию пожарного извещателя получено авторское свидетельство СССР на изобретение [3.14].



Рис. 3.15. Структурная схема универсального стенда для снятия характеристик пожарных извещателей

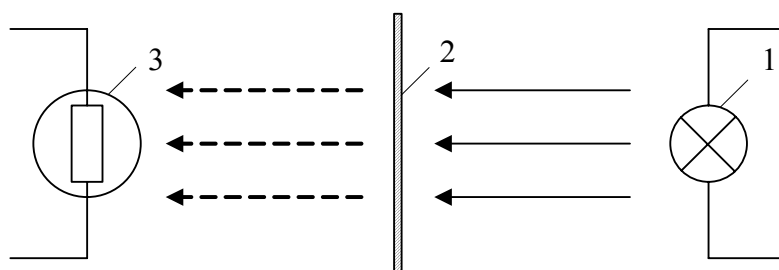


Рис. 3.16. Схема оптического узла пожарного извещателя:

- 1 – источник излучения;
- 2 – экран с термоиндикаторным покрытием;
- 3 – приёмник излучения

Инерционность срабатывания извещателя по температуре зависит от толщины термоиндикаторного покрытия, в тоже время толщина термopокрытия влияет на светонепроницаемость экрана в дежурном режиме. При незначительной толщине термopокрытия экран становится полупрозрачным, что приводит к ложным срабатываниям, поэтому возникает необходимость определить оптимальную толщину термopокрытия, которая удовлетворяла бы требованиям инерционности и не вызывала ложных срабатываний.

На рис. 3.17 приведены результаты измерений времени срабатывания действующей модели извещателя в зависимости от толщины термоиндикаторного покрытия, испытания проводились в термокамере универсального стенда для снятия характеристик пожарных извещателей, при постоянной температуре 75 °С, являющейся температурой перехода для термоиндикаторной краски плавления марки ТИ-75, которой покрывался экран. В качестве подложки использовалась полиимидная пленка толщиной 0,4 мм, для каждого значения толщины термopокрытия было изготовлено и испытано по три легкоъемных экрана.

Сопоставив полученные результаты времени срабатывания и работоспособности извещателя, выбираем оптимальную толщину слоя термоиндикаторной краски плавления, которая находится в пределах от 0,05 до 0,1 мм.

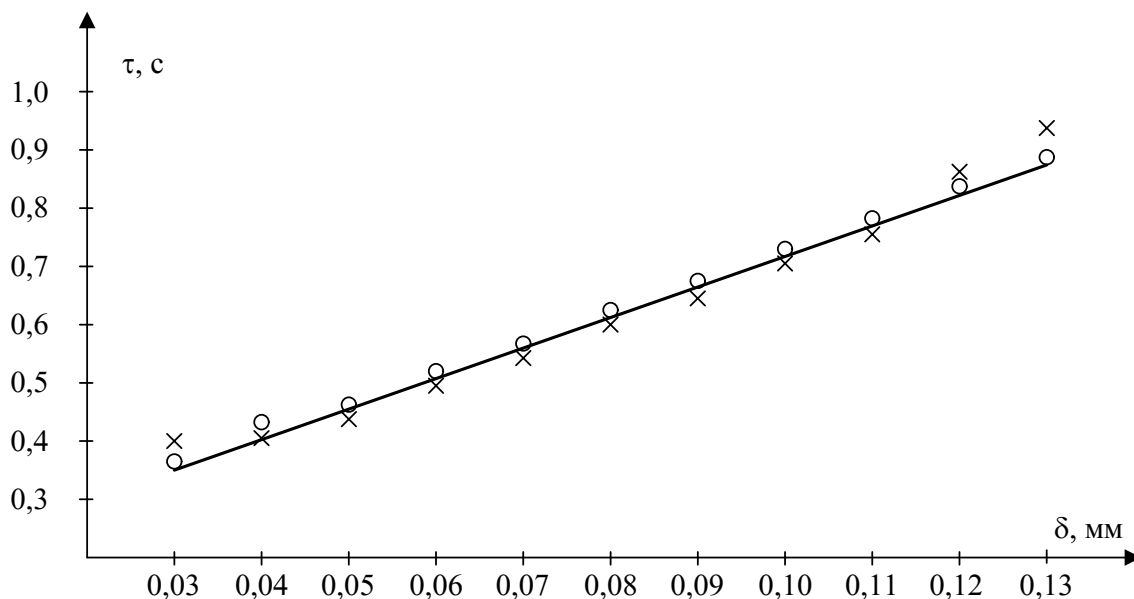


Рис. 3.17. График зависимости времени срабатывания модели извещателя от толщины слоя термopокpытия:

× ○ - экспериментальные значения

3.4. Тепловые пожарные извещатели для взрывоопасных и агрессивных сред

3.4.1. Линейный тепловой извещатель

Для объектов в помещениях которых имеется взрывоопасная среда желательно, чтобы пожарный извещатель не имел токоведущих частей, искрение которых может привести к взрыву [3.8].

Например, на объектах агропромышленного комплекса, таких как животноводческие фермы, птицеводческие фабрика, агрессивная и влажная среда не позволяет использовать существующие пожарные извещатели так как из-за коррозии токоведущих частей они быстро выходят из строя. Для использования на подобных объектах разработан пожарный извещатель, чувствительный элемент которого не содержит токоведущих частей и связан и электронной схемой световодом.

В состав разработанного пожарного извещателя входят источник оптического излучения, приемник излучения, система передачи излучения и чувствительный элемент. В качестве системы передачи излучения используется коаксиальный световод. На торцевую часть световода герметично надет металлический колпачок сферической формы. Внутренняя поверх-

ность колпачка является светоотражающей и покрыта слоем термоиндикаторной краски плавления. От источника излучение передается по внутренней жиле световода и, отразившись от колпачка, по внешней жиле световода попадает в приемник излучения. При повышении температуры термокраска обесцвечивается, отражательная способность сферической части колпачка увеличивается, поток отраженного излучения возрастает. Приёмник регистрирует два уровня излучения: низкий соответствует дежурному режиму, высокий – режим тревоги, пропадание излучения сигнализирует о неисправности. На рис. 3.18 представлена схема такого пожарного извещателя.

Металлический сферический колпачок герметически надет на торец коаксиального световода, и имеет внутреннюю светоотражающую поверхность, на которую нанесен термочувствительный элемент в виде термоиндикаторной краски плавления. Колпачок выполнен тонкостенным и обладает высоким коэффициентом теплопроводности.

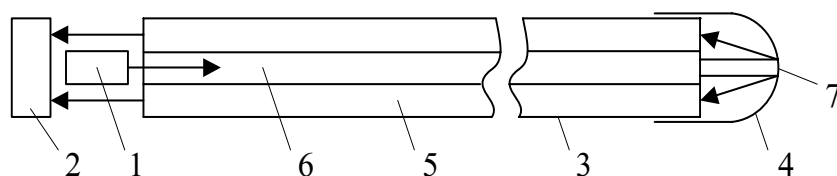


Рис. 3.18. Схема пожарного извещателя:

- 1 – источник излучения;
- 2 – приёмник излучения;
- 3 – система передачи излучения (коаксиальный световод);
- 4 – металлический сферический колпачок;
- 5 – внешний световод (передающий);
- 6 – внутренний световод (приёмный);
- 7 – слой термоиндикатора

В дежурном режиме излучение от источника распространяется по внутреннему световоду до его торца, далее часть излучения отразившись от сферической поверхности колпачка, покрытой термоиндикаторной краской плавления, попадает на торец внешнего световода и по нему передается к приемнику излучения и фиксируется в нем. При повышении температуры в контролируемом помещении до определенного значения термоиндикаторная краска расплавляется и становится прозрачной, за счет чего резко увеличивается поток отраженного от сферического колпачка излучения, которое по внешнему световоду попадает на приемник излуче-

ния, где фиксируется резкое увеличение потока излучения и вырабатывается сигнал тревоги.

Для определения влияния толщины термоиндикаторного покрытия на отражающую способность внутренней поверхности колпачка проведены экспериментальные исследования. Исследования проводились в условиях лаборатории ТИПО Ташкентского Технического Университета. Термоиндикаторная краска плавления марки ТИ-75 наносилась на отполированные до зеркального блеска образцы из нержавеющей стали. Для каждого значения толщины покрытия испытывалось по три образца.

График зависимости полученной в результате испытаний, представлен на рис. 3.19.

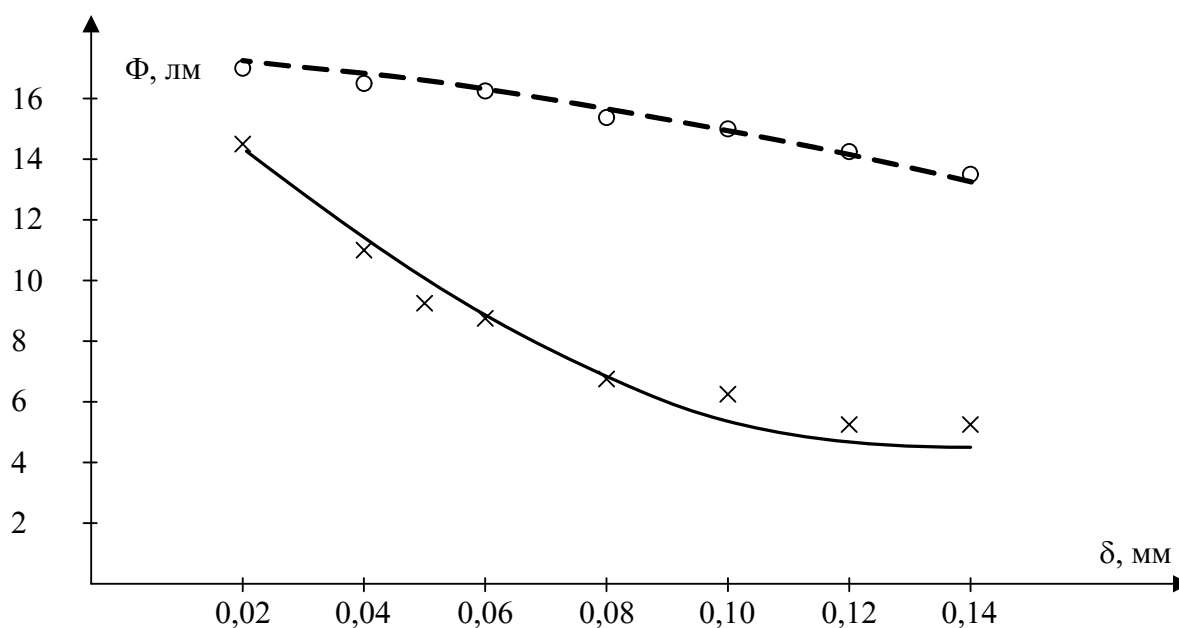


Рис. 3.19. Графики зависимости отражённых световых потоков от толщины слоя термоиндикаторного покрытия:

- - - - - до термического воздействия;
- — — — — после термического воздействия

Из результатов экспериментальных исследований видно, что оптимальным, различимым для инструментального восприятия светового потока, диапазоном толщин покрытия термоиндикаторной краски следует принимать значения (0,05 - 0,1) мм. На разработанную конструкцию пожарного извещателя получено авторское свидетельство СССР на изобретение [3.15].

3.4.2. Точечный извещатель с оптоволоконным световодом

Целью разработки является повышение функциональной надежности работы устройства агрессивных и взрывоопасных средах.

Поставленная цель достигается тем, что в пожарном извещателе содержащим источник излучения, систему передачи излучения в контролируемое пространство в виде секций световода и приемника излучения, секции световода герметично соединены между собой металлическими муфтами, внутри которых находится термоиндикаторный состав, изменяющий в зависимости от температуры свою способность пропускать излучение.

В отличие от прототипа, в разработанном устройстве, секции световода соединены между собой муфтами, поэтому отпадает необходимость в элементах фокусировки, исключаются ложные срабатывания за счет появления в разрывах между секциями световода запыленной или загазованной среды, отсутствует влияние агрессивной среды на торцы световода, кроме того используется обычный, а не коаксиальный световод.

Существующие световоды, как правило, конструктивно представляют собой гибкие волоконно-оптические жгуты, покрытые защитной оболочкой, и предназначены для подсветки и наблюдения труднодоступных мест, передачи информации, изображения на расстояние по криволинейному пути. Защитная оболочка позволяет использовать световоды в условиях агрессивной среды.

На рис.3.20 представлена схема разработанного извещателя.

На схеме представлен пожарный извещатель, состоящий из источника излучения 1, приемника излучения 2, секций световода 3, соединенных муфтами 4, внутри муфт торцы световода разделяет термоиндикаторный состав 5. Муфты выполнены тонкостенными и обладают высоким коэффициентом теплопередачи. В качестве термоиндикаторного состава могут быть использованы термохимические, жидкокристаллические или люминесцентные термоиндикаторы, изменяющие свою прозрачность, цвет или способность люминесцировать, при достижении определенного значения температуры.

Извещатель работает следующим образом. В дежурном режиме излучение от источника излучения распространяется по секции световода до его торца, далее проходит через прозрачный слой термоиндикаторного состава, попадает в следующую секцию световода и так далее до последней секции световода с торца которой попадает на приемник излучения и фиксируется в нем. При повышении температуры в контролируемом помещении индикаторный состав изменяет свою прозрачность, в результате приемник излучения фиксирует резкое уменьшение потока излучения и фор-

мирует сигнал тревоги. Вследствие повышения температуры в контролируемом помещении, возникает соответствующий сигнал тревоги приемника излучения и срабатывает система сигнализации.

Разработанное устройство может применяться во взрывоопасных помещениях различных производств, т.к. в нем нет токоведущих частей, способных вызвать искру (источник и приемник излучения можно располагать вне пределов контролируемого помещения).

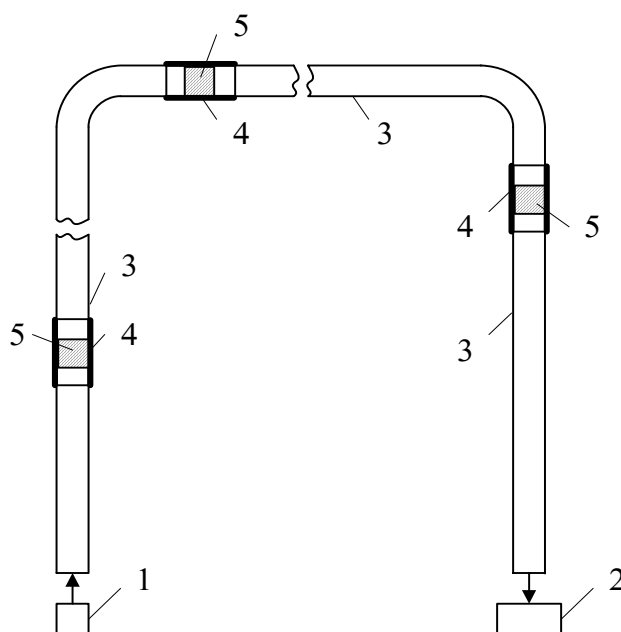


Рис. 3.20. Схема пожарного извещателя:

- 1 – источник излучения;
- 2 – приёмник излучения;
- 3 – секции световода;
- 4 – соединительные муфты;
- 5 – термоиндикаторный состав

Муфты придают термоиндикаторному составу геометрическую форму световода, проводят тепло от окружающей среды к термосоставу, изолируют торцы световода и термоиндикаторный состав от воздействия агрессивной и пожаро-взрывоопасной среды. В отличие от прототипа, в разработанной конструкции кроме системы передачи излучения, содержится только источник и приемник излучения, что значительно сокращает элементную базу изделия, а, следовательно, повышает надежность. Используемый световод покрыт, для защиты от воздействия агрессивной среды, покрыт химически стойкой оболочкой.

В качестве термоиндикаторного состава предлагается использовать, в зависимости от необходимой температуры срабатывания, иттрий бромноватистокислый, кадмий хлорноватистокислый, цинк бромноватисто-

кислый. В табл. 3.4 приводятся результаты измерения коэффициента пропускания T указанных составов в зависимости от температуры воздействия. Условия измерения: l - толщина исследуемых образцов 0,3 мм, источник излучения - лампа типа КГМ 6,6 - 100.

Таблица 3.4

Температура воздействия, °С	Иттрий бромноватисто-кислый, T	Кадмий хлорноватисто-кислый, T	Цинк бромноватисто-кислый, T
40	0,93	0,92	0,92
60	0,93	0,92	0,92
65	0,24	0,92	0,92
70	0,24	0,92	0,92
75	0,24	0,92	0,92
80	0,24	0,22	0,92
85	0,24	0,22	0,92
90	0,24	0,22	0,92
95	0,24	0,22	0,92
100	0,24	0,22	0,21
110	0,24	0,22	0,21

Исходя из результатов проведенных измерений, можно рекомендовать: для температуры срабатывания 65 °С использовать иттрий бромноватистокислый, для температуры срабатывания 80 °С - кадмий хлорноватистокислый, для температуры срабатывания 100 °С - цинк бромноватистокислый.

Как видно из результатов проведенных измерений, модель извещателя работоспособна при толщине слоя термосостава разделяющего торцы секций световодов от 0,1 до 0,6 мм, но с увеличением количества соединительных муфт увеличивается суммарная толщина слоев термосостава и световой поток ослабевает, что приводит к неустойчивой работе устройства.

Экспериментально установлено, что если суммарная толщина слоев термосостава превышает 7 мм, то из-за уменьшения потока излучения возникают ложные срабатывания. Таким образом, можно принять оптимальное значение толщины термосостава, разделяющего торцы соседних секций световода в пределах от 0,15 до 0,45 мм, что позволит в линии передачи излучения иметь от 13 до 40 муфт, т.е. контролировать температуру от 13 до 40 точек.

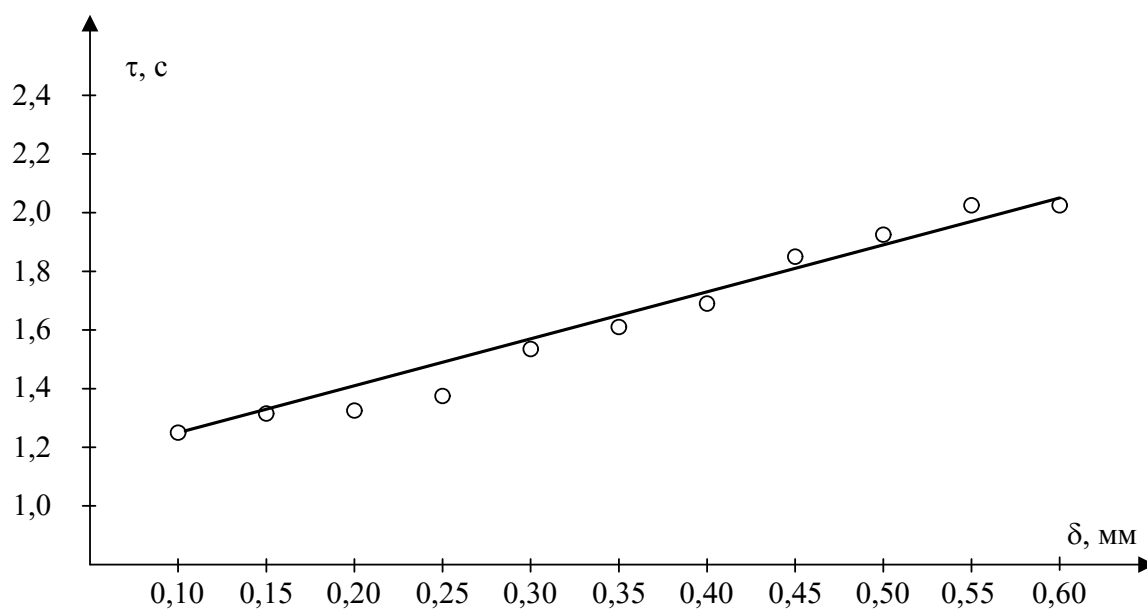


Рис. 3.21. График зависимости времени срабатывания модели извещателя от толщины слоя иттрия бромованатадистокислого

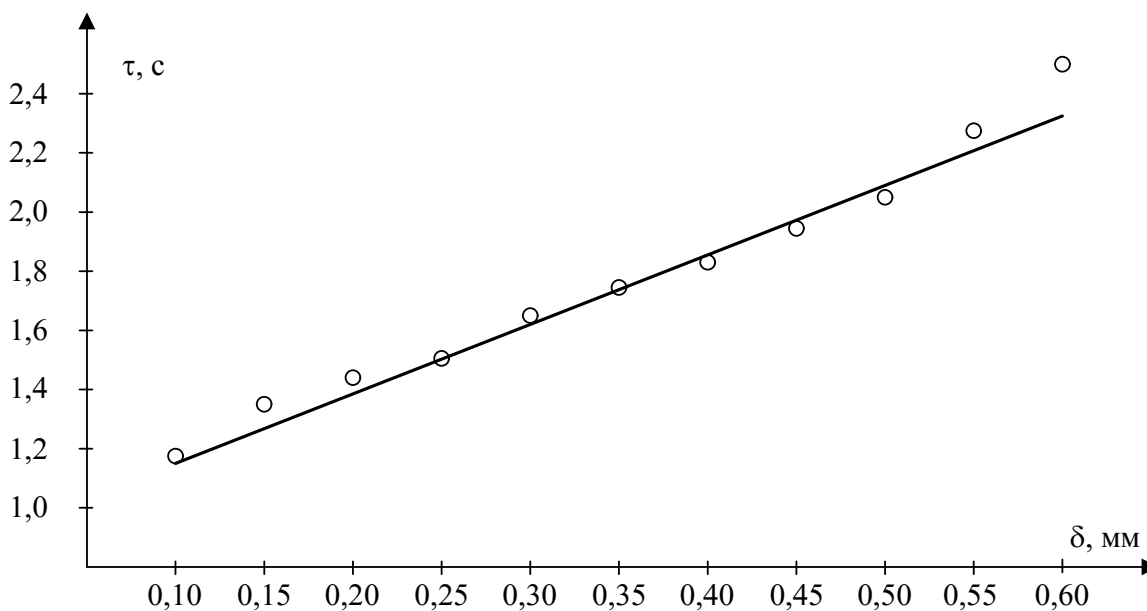


Рис. 3.22. График зависимости времени срабатывания модели извещателя от толщины слоя кадмия хлорванатадистокислого

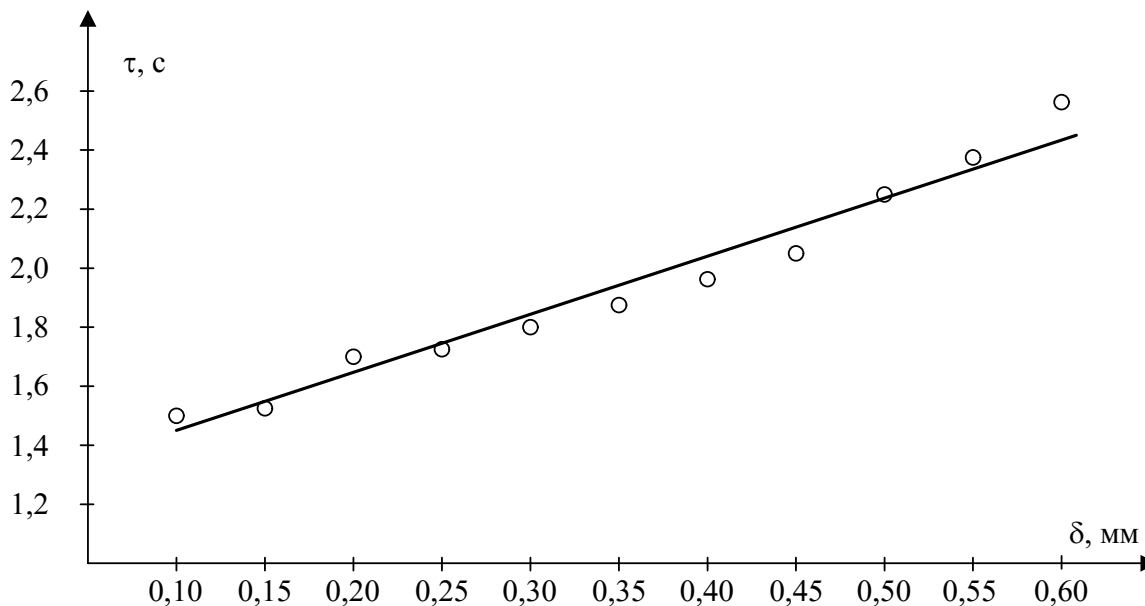


Рис. 3.23. График зависимости времени срабатывания модели извещателя от толщины слоя цинка бромноватистокислого

Уменьшать толщину слоя термосостава и тем самым увеличивать количество муфт нецелесообразно, так как начинает сказываться уменьшение потока излучения из-за частичного отражения излучения в местах соприкосновения торцов секций световодов с термосотавом. Современные световоды позволяют передавать информацию без усиления на расстояние в несколько километров, поэтому потери излучения в секциях световода не учитывались.

На разработанную конструкцию линейного пожарного извещателя получено авторское свидетельство СССР на изобретение [3.16].

3.5. Тепловой тонкопленочный термоэлектрический пожарный извещатель

Недостатком пожарных извещателей с использованием генераторных датчиков является низкая чувствительность и значительная инерционность, обусловленные применением в качестве чувствительного элемента относительно массивной проволочной конструкции. Например, известный извещатель типа ДПС-038 содержит батарею хромель-копелевых термопар, включенных последовательно и блок обработки сигнала. Условием срабатывания такого извещателя является скачкообразное повышение температуры в месте расположения "горячих" спаев не менее чем на 30 °С

в течение 7 с (при этом на концах термобатареи возникает термо-ЭДС 17 – 20 мкВ). Кроме того, конструкция извещателя ДПС-038 не позволяет использовать его в помещениях с агрессивной средой, поскольку чувствительный элемент имеет непосредственный контакт с воздухом, из-за использования серебра извещатели имеют высокую стоимость.

Задачей разработки является создание такого пожарного извещателя, который обладал бы повышенной чувствительностью, быстродействием, мог эксплуатироваться в агрессивных средах и не имел элементов, выполненных из драгоценных металлов.

Поставленная задача достигается тем, что в тепловом пожарном извещателе, включающем чувствительный элемент и блок обработки сигнала, чувствительный элемент выполнен в виде пленочной полупроводниковой термобатареи на диэлектрической подложке. Обратная сторона подложки фольгирована в месте расположения "холодных" спаев и покрыта чернящим составом в месте расположения "горячих" спаев, причем термобатарея помещена в корпус из теплоемкого металла, одна из торцевых стенок которого имеет отверстие для приемного окна. Диэлектрическая подложка герметично примыкает фольгированной стороной к внутренней стенке корпуса с отверстием таким образом, что отверстие для приемного окна расположено напротив "горячих" спаев батареи. Предпочтительно, диэлектрическую подложку выполнить из полимерной пленки.

В общепринятых конструкциях термоэлектрических пожарных извещателей "горячий" спай термобатареи находится в непосредственном контакте с окружающей средой. Замена проволочных металлических термопар на пленочную полупроводниковую термобатарею позволяет: во-первых, значительно повысить чувствительность и быстродействие, поскольку полупроводниковая пленочная термобатарея имеет чувствительность на порядок выше; во-вторых, диэлектрическую подложку пленочной термобатареи можно использовать не только как несущую основу, но и как защитный экран от воздействия внешней окружающей среды. При этом диэлектрическая основа несколько заглубляет чувствительность пленочной термобатареи, снижая тем самым вероятность ложных срабатываний.

Конструктивно разработанный пожарный извещатель устроен так, что его элементы находятся в герметичном корпусе с приемным окном в виде отверстия. Термобатарея внутри корпуса герметично примыкает обратной стороной подложки к приемному окну и, таким образом, не имеет непосредственного контакта с окружающей средой. "Горячие" спаи термобатареи расположены напротив приемного окна, а "холодные" - заэкранирова-

ны корпусом извещателя, благодаря чему создается разность температур между "горячими" и "холодными" спаями.

Именно сочетание высокой чувствительности и малой инерционности полупроводниковых пленочных элементов с наличием у них подложки, которую можно использовать как защиту от окружающей среды, позволило разработать высокочувствительный и малоинерционный извещатель, который можно использовать для работы в агрессивных средах.

На рис. 3.24 приводится схема пожарного извещателя. Пленочная термобатарея 1 сформирована на диэлектрической подложке 2 и имеет "горячие" 3 и "холодные" 4 спаи.

Обратная сторона подложки, покрытая фольгой 5, герметично примыкает к корпусу 6 пожарного извещателя. Корпус изготовлен из теплоемкого металла, например меди, и выполняет функции теплоотвода для "холодных" спаев. "Горячие" спаи термобатареи располагаются напротив приемного окна 7 корпуса пожарного извещателя.

Существенным моментом является то, что подложкой чувствительного элемента является полимерная пленка, обладающая высокой стойкостью к различным агрессивным средам, так как в данной конструкции пожарного извещателя подложка выполняет функции защиты от воздействия агрессивной среды, в том числе паров некоторых кислот, щелочей, растворителей.

Для термоэлектрических батарей можно использовать системы типа Bi-Sb, (Bi Se)₂ Te₃-Bi (Se Te)₃, т.е. полупроводниковые материалы, имеющие высокую эффективность в диапазоне температур окружающей среды от минус 50 до +150 °C.

Извещатель работает следующим образом: ИК - излучение, конвективный поток горячего воздуха через приемное окно разогревают диэлектрическую подложку в месте расположения "горячих" спаев. Для срабатывания пожарного извещателя скачкообразный перепад температуры между "горячими" и "холодными" спаями должен составлять $1,5 \div 2$ °C за $1 \div 2$ с. Такой перепад температуры создает быстро внесенная в сектор обзора извещателя пластина размером 1 м^2 , разогретая до 100 °C, находящаяся на расстоянии 3 м от поверхности чувствительного элемента. При этом на выходе термобатареи в течение 0,5 с. появляется сигнал порядка $1,5 \div 2$ мВ, который усиливается схемой и передается извещателем на приемную аппаратуру пожарной сигнализации.

На разработанную конструкцию пожарного извещателя получен Патент Республики Узбекистан на изобретение [3.17].

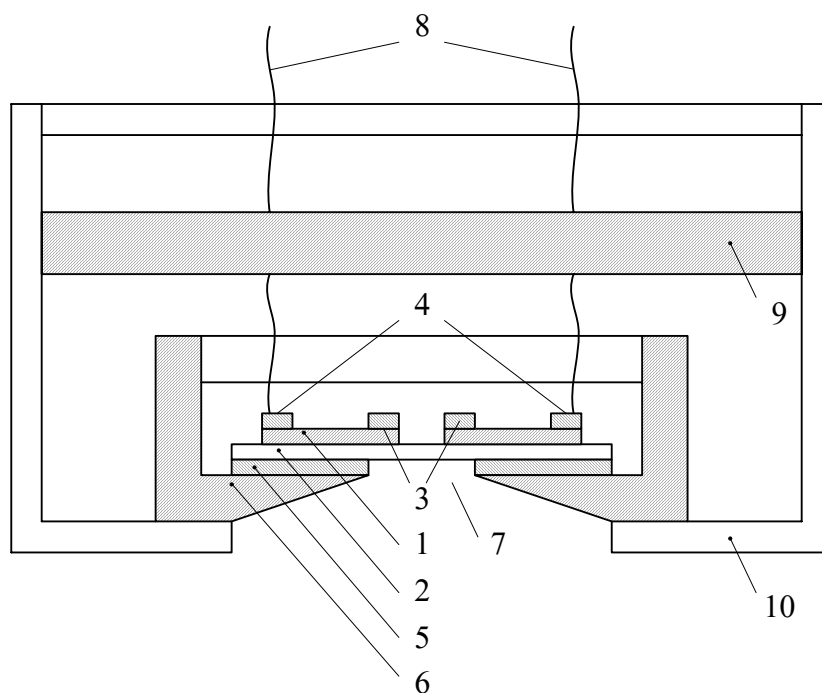


Рис. 3.24. Схема термоэлектрического пожарного извещателя:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – плёночная термобатарея; | 6 – корпус чувствительного элемента; |
| 2 – диэлектрическая подложка; | 7 – приёмное окно; |
| 3 – "горячие" спаи; | 8 – тоководы; |
| 4 – "холодные" спаи; | 9 – блок обработки сигнала; |
| 5 – фольга; | 10 – корпус извещателя |

В разработанном извещателе в качестве чувствительного элемента использован термоэлектрический модуль ТЭМ-5 разработанный и изготавливаемый Специализированным конструкторско-техническим бюро Института электроники Академии наук Республики Узбекистан.

Модуль имеет следующую конструкцию: на фольгированном диэлектрике, представляющим собой "сэндвич", верхний слой которого является полиамидной пленкой толщиной ~16 мкм, а нижний - медной фольгой толщиной примерно 35 мкм, на полиамидном слое методами фотолитографии и вакуумного распыления сформирована пленочная термобатарея.

Ветви термобатареи выполнены из твердых растворов халькогенидов висмута и сурьмы. Ветви расположены радиально, причем сходящиеся к центру термоспаи являются тепловоспринимающими - "горячими", а спаи, лежащие на внешней окружности и находящиеся через полиамидную пленку в тепловом контакте с медной фольгой и корпусом, являются "холодными".

В месте расположения "горячих" спаев в медной фольге вытравлено отверстие диаметром 5 мм, являющееся приемной площадкой для ИК-излучения и нанесен вместо фольги чернящий состав на основе графита для повышения оптического поглощения полиамидной пленки. Диэлектрическая подложка с термобатареей размещена в медном корпусе диамет-

ром 22 мм и высотой 5 мм. Дно корпуса имеет отверстие. При этом подложка герметично примыкает фольгированной стороной ко дну корпуса, а отверстие в фольге совпадает с отверстием в корпусе. Токоотводы выведены через крышку медного корпуса чувствительного элемента и подсоединены к блоку усиления и обработки сигнала.

Технические характеристики модуля ТЭМ - 5

Диапазон измеряемой плотности теплового потока, кВт/м ²	0 ÷ 5
Спектральный диапазон измерения теплового потока, мкм	0,2 ÷ 4,0
Чувствительность модуля при 20 °С не менее, мВ·м ² /кВт	10
Температурный коэффициент чувствительности, не более % град ⁻¹	0,1
Показатель термической инерции не более, с	1
Сопротивление электрической цепи термобатареи	
при 2 °С не более, кОм	1,5
Основная погрешность измерения теплового потока, %	± 6
Масса модуля не более, г	10

Электрическая схема пожарного извещателя конструктивно выполнена в виде круглой печатной платы диаметром 60 мм.

Принципиальная схема (рис. 3.25) представляет блок, выполненный на операционном усилителе (ОУ) DA, работающий в режиме компаратора.

Резисторный мост R1 – R5 приводит напряжение на входах ОУ к половине питающего напряжения и резистором R1 устанавливается необходимый порог срабатывания компаратора, настраиваемый по уровню сигнала с чувствительного элемента, подключенного непосредственно между входами ОУ. Конденсаторы C1, C2 и C3 служат для уменьшения электромагнитных наводок на вход операционного усилителя. Резисторами R7, R8 устанавливается необходимый коэффициент усиления ОУ и они могут быть заменены одним резистором номиналом 2 мОм. Резистор R6 ограничивает выходной ток ОУ.

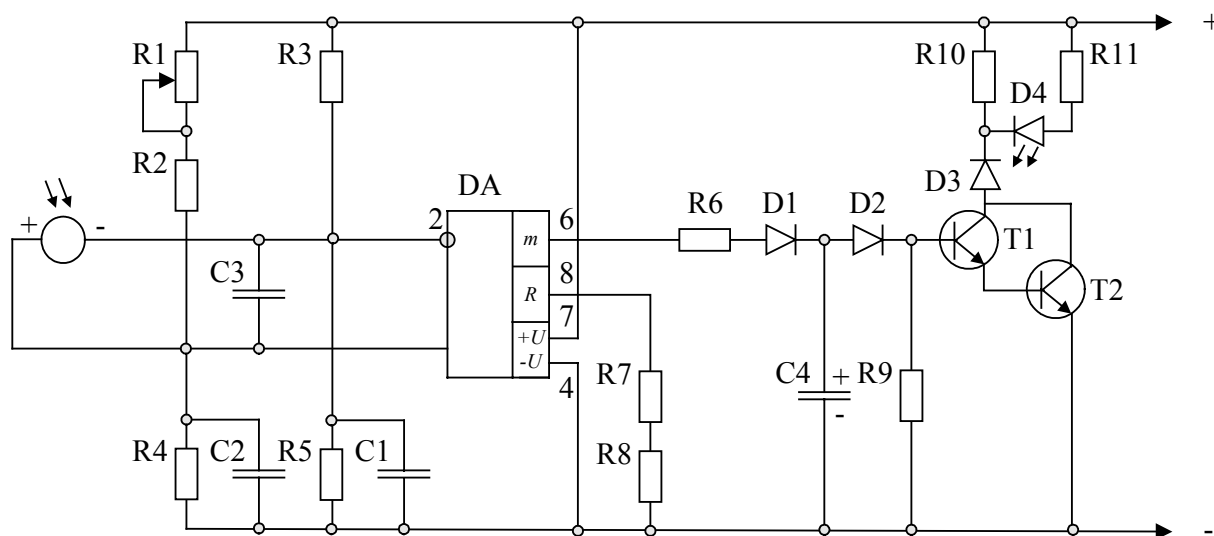


Рис. 3.25. Принципиальная электрическая схема пожарного извещателя

В режиме "ожидания" ток потребления схемы можно изменить одновременным изменением номиналов резисторов R2 - R5, но при большом увеличении их номиналов уменьшится коэффициент усиления ОУ.

Компаратор управляется ключом, выполненным на транзисторах Т1, Т2. Нагрузка в коллекторах этих транзисторов определяет ток в режиме "срабатывания". Для увеличения тока необходимо уменьшить номинал резистора R10 и наоборот.

При повышенных напряжениях питания необходимо увеличивать номинал резистора R11 для предотвращения выхода из строя светодиода Д4 служащего индикатором "срабатывания" устройства.

Последовательно с нагрузкой ключа в цепи коллектора включен стабилитрон ДЗ, обеспечивающий остаточное напряжение в цепи питания операционного усилителя в режиме "срабатывания" и тем самым удержание транзисторного ключа в открытом состоянии.

Диоды D1, D2 и емкость C4 включены в базу транзистора Т1 служат для предотвращения ложных срабатываний ключа от помех. Напряжение питания схемы может меняться от 15 до 30 В, но при больших изменениях напряжения требуется подстройка срабатывания компаратора резистором R1.

Методика расчета пороговой температуры поверхности чувствительного элемента пожарного извещателя

Расчет температуры поверхности производится для пластины площадью 1 м², внесенной в зону, контролируемую пожарным извещателем, угол обзора пожарного извещателя 90°.

В конструкции пожарного извещателя оговорено, что он срабатывает при появлении на выходе термобатареи сигнала $U = 1,5 \text{ мВ}$, поэтому получаем:

$$K = \frac{U}{E}, \quad (3.5.1)$$

где K - чувствительность $\sim 30 \text{ мВ} \cdot \text{м}^2 / \text{кВт}$;

$$E = \frac{U}{K} = \frac{1,5 \text{ мВ} \cdot \text{кВт}}{30 \text{ мВ} \cdot \text{м}^2} = 0,05 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; \quad (3.5.2)$$

$$E = E_T - E_K, \quad (3.5.3)$$

где E - облученность извещателя (величина лучистого потока);

E_T - облученность, создаваемая пластиной, нагретой до температуры T ;

E_K - облученность от пластины, нагретой до комнатной температуры T_K .

$$E_T = \frac{\varepsilon \sigma T^4 S \cos \varphi}{R^2}; \quad (3.5.4)$$

$$E_K = \frac{\varepsilon \sigma T_K^4 S \cos \varphi}{R^2}; \quad (3.5.5)$$

$$E = \frac{\varepsilon \sigma T^4 S \cos \varphi}{R^2} - \frac{\varepsilon \sigma T_K^4 S \cos \varphi}{R^2} = \varepsilon \sigma \frac{S}{R^2} (T^4 - T_K^4) \cos \varphi, \quad (3.5.6)$$

где ε - интегральная излучательная способность; σ - постоянная Стефана - Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·град⁴.

Облученность, создаваемая пластиной с температурой T , приводящая к срабатыванию извещателя вычисляется по формуле

$$E_T = E + E_K = 50 + \frac{\varepsilon \sigma T_K^4 S \cos \varphi}{R^2}. \quad (3.5.7)$$

После вычисления E_T определим температуру пластины из формулы

$$E_T = \frac{\varepsilon \sigma T^4 S \cos \varphi}{R^2}, \text{ получаем } T^4 = \frac{E_T R^2}{\varepsilon \sigma S \cos \varphi}. \quad (3.5.8)$$

Например: $S = 1 \text{ м}^2$, $\cos \varphi = 1$, $R = 3 \text{ м}$, $\varepsilon = 0,9$, $T_K = 300 \text{ °К}$.

$$E_K = \frac{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 81 \cdot 10^8}{9} = 45,93 \text{ Вт/м}^2;$$

$$E_T = 50 + 45,93 = 95,93 \text{ Вт/м}^2;$$

$$T^4 = \frac{95,3 \cdot 9}{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} = 176,38 \cdot 10^8;$$

$$T = 364 \text{ К} = 94 \text{ °С}.$$

По данной методике произведен расчет температур поверхностей пластины, вызывающих срабатывание извещателя, при высотах установки извещателя от 1 до 9 м, для разных температур окружающей среды. Положение пластин в зоне контроля извещателя приведена на рис. 3.26.

С учетом результатов расчетов установлена оптимальная площадь, защищаемая одним извещателем, которая составляет:

при высоте установки извещателя до 6 м - 30 м²;

при высоте установки извещателя до 9 м - не более 35 м².

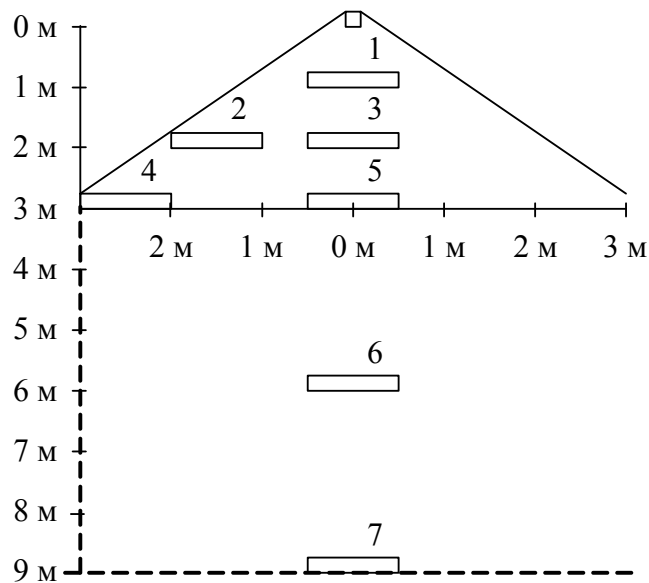


Рис. 3.26. Схема расположения пластин в зоне контроля извещателя

При проведении экспериментальной проверки в зону, контролируемую извещателем, вносился алюминиевый лист, площадью 1 м^2 , толщиной 10 мм, нагретый до температуры срабатывания извещателя.

3.6. Тепловой полупроводниковый извещатель

Рассмотрим возможность использования эффекта температурной зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике для создания пожарного извещателя.

Согласно теории Шокли-Рида, рассматривающей рекомбинацию неосновных неравновесных по концентрации носителей заряда через локальные центры (ловушки) одного типа для случая низкого уровня инжекции и малой концентрации ловушек, время жизни определяется выражением [3.18]:

$$\tau_{\text{ннз}} = \tau_{p0} \frac{n_0 + N_{cm}}{n_0 + p_0} + \tau_{p0} \frac{p_0 + P_{vm}}{n_0 + p_0}; \quad (3.6.1)$$

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\gamma_p M_{\text{л}}}; \quad (3.6.2)$$

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\gamma_n M_{\text{л}}}, \quad (3.6.3)$$

где n_0, p_0 - концентрация свободных электронов и дырок в полупровод-

нике соответственно; M_d - концентрация ловушек; γ_n, γ_p - коэффициенты рекомбинации, определяющие вероятность захвата центром электрона и дырки соответственно; N_{cm}, P_{vm} - величины концентраций электронов и дырок соответственно в полупроводнике, уровень Ферми в котором проходит через энергетический уровень ловушек; τ_{po} - время жизни дырок в сильно легированном полупроводнике n -типа; τ_{no} - время жизни электронов в сильно легированном полупроводнике p -типа.

Рассмотрим температурную зависимость $\tau_{ннз}$ в электронном полупроводнике, в котором уровень ловушек расположен в верхней половине запрещённой зоны. При $n_o \gg p_o$:

$$\tau_{ннз} \cong \tau_{po} \left(1 + \frac{N_{cm}}{n_o} \right). \quad (3.6.4)$$

Из выражения (3.6.4) следует, что время жизни $\tau_{ннз}$ определяется процессами рекомбинации неосновных носителей заряда - дырок τ_{po} , и не зависит от температуры, если $N_{cm} \ll n_o$. Это условие выполняется, если уровень Ферми лежит выше уровня ловушек. При дальнейшем возрастании температуры концентрация электронов остается постоянной (до температуры, при которой начинают преобладать процессы термогенерации), а N_{cm} резко возрастает. После температуры T_n , выше которой член N_{cm}/n_o становится больше единицы, начинается рост $\tau_{ннз}$.

На рис. 3.27 приведены расчётные кривые температурной зависимости времени жизни $\tau_{ннз}$ для n -кремния (кривые 1, 2).

Точки перегиба кривых 1, 2 на рис. 3.27 τ_{n1}, τ_{n2} соответствуют условию равенства уровня Ферми и уровня ловушек и целиком определяется удельным сопротивлением исходного кремния (через n_o) и свойствами присутствующих в нём рекомбинационных примесей. Крутизна зависимости на наклонном участке определяется глубиной создаваемых этими примесями уровней в запрещённой зоне полупроводника. Аналогичные зависимости можно получить, рассматривая p -кремний с энергетическими уровнями ловушек в нижней половине запрещённой зоны.

В реальных случаях во многих полупроводниках (в том числе наиболее распространенных - кремнии и германии) кинетика неравновесных процессов, отличаясь большей сложностью, соответствует в основном теории Шокли-Рида. На рис. 3.27 изображены полученные экспериментально

зависимости $\ln \left(\frac{\tau_{ннз}}{\tau_{po}} \right) = f \left(\frac{1}{T} \right)$ для n -кремния с различной исходной концентрацией основных носителей n_o с радиационными дефектами (кривая 3)

и с рекомбинационными примесями (кривая 4). Из рисунка следует, что, выбирая соответствующую рекомбинационную примесь, можно увеличить крутизну зависимости $\tau_{\text{ннз}}$ от температуры. В диапазоне температур 313-423 К (40-150 °С) время жизни ($\tau_{\text{ннз}}$) изменяется почти в десять раз. Это создает реальную возможность создания чувствительного элемента теплового извещателя с высокой разрешающей способностью, особенно в области температур больше 343 К (70 °С).

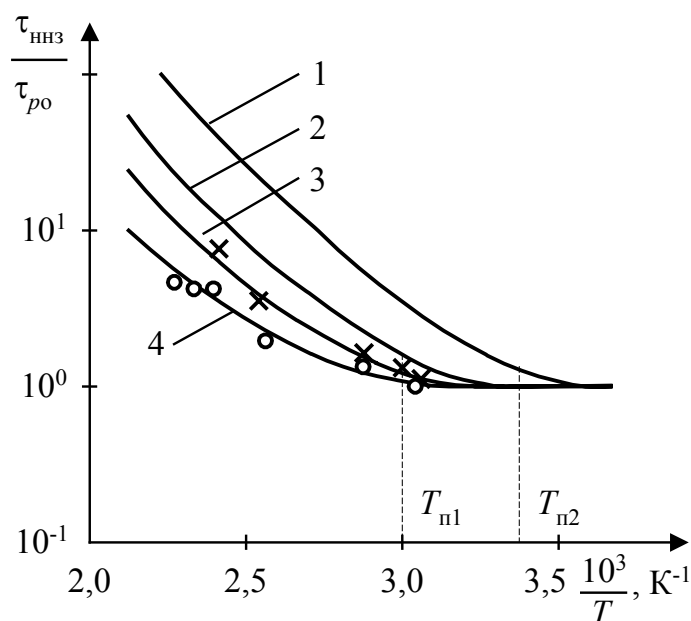


Рис. 3.27. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в *n*-кремнии от температуры:

- | | |
|--|---|
| 1 - $E_{\text{м}} = 0,25$ эВ; | $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; |
| 2 - $E_{\text{м}} = 0,35$ эВ; | $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; |
| 3 - $E_{\text{м}} = 0,40$ эВ; | $n_0 = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; |
| Радиационные дефекты, доза облучения $5 \cdot 10^3$ рад; | |
| 4 - <i>n</i> -Si, легированный Co; | $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ |
- ×, ○ – экспериментальные значения

Существует несколько методов измерения времени жизни в полупроводниках. Одним из наиболее простых и удобных для технической реализации является импульсный метод измерения $\tau_{\text{ннз}}$ в базе полупроводникового диода, известный в литературе как метод Кингстона [3.18]. Метод основан на анализе длительности фазы высокой обратной проводимости при скачкообразном изменении полярности прикладываемого к диоду напряжения с прямой на обратную. Электрическая схема и временные диаграммы переходного процесса переключения приведены на рис. 3.28.

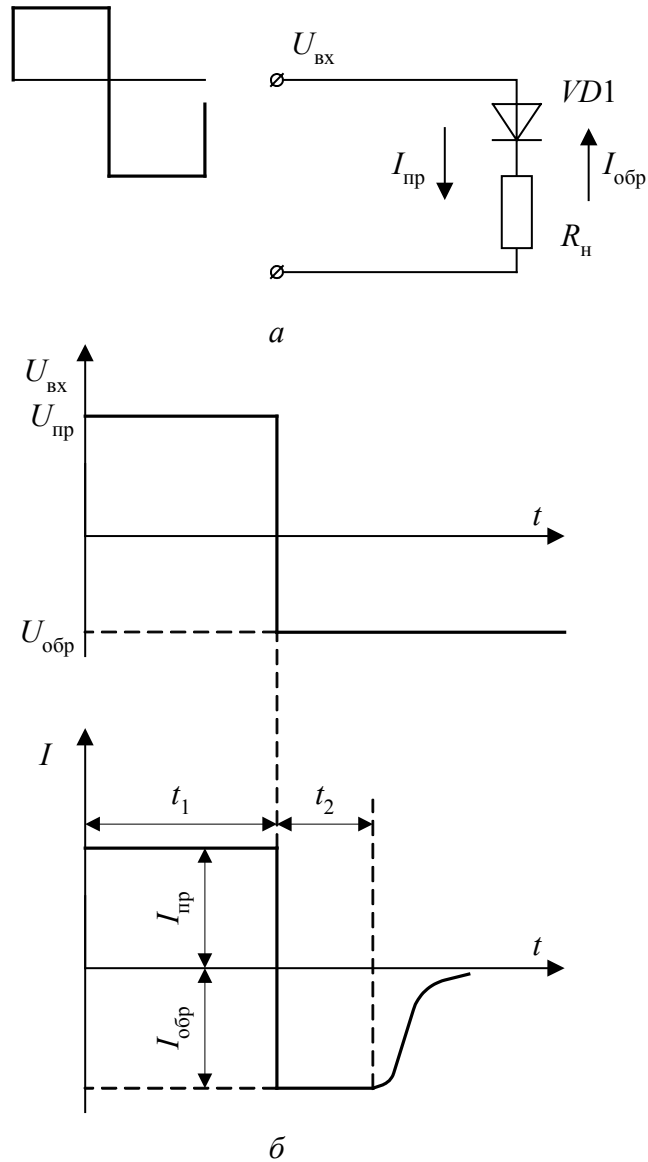


Рис. 3.28. Схема переключения полупроводникового диода (а) и временные диаграммы переходного процесса (б) в нём

Длительность t_2 фазы высокой обратной проводимости определяется из выражения:

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_2}{\tau_{\text{ннз}}}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{обр}}}{I_{\text{пр}}}}, \quad (3.6.5)$$

где $I_{\text{пр}}$, $I_{\text{обр}}$ - амплитуды прямого и обратного токов через полупроводниковый диод.

Выражение (3.6.5) получено для плоскостного диода с широкой базой в предположении равенства коэффициента инжекции единице. Это при-

ближение с хорошей точностью выполняется для большинства современных выпрямительных диодов. Из выражения (3.6.5) следует, что длительность t_2 фазы высокой обратной проводимости определяется только временем жизни и режимом переключения $I_{\text{обр}}/I_{\text{пр}}$. Таким образом, при заданном постоянном отношении $I_{\text{обр}}/I_{\text{пр}}$ изменение длительности t_2 фазы высокой обратной проводимости с изменением температуры целиком определяется температурной зависимостью времени жизни $\tau_{\text{ннз}}$. Форма импульса высокой обратной проводимости близка к прямоугольной и удобна для последующей обработки и анализа цифровыми методами.

Зависимость длительности t_2 фазы высокой обратной проводимости от режима переключения приведена на рис. 3.29. Рисунок показывает на имеющуюся возможность эффективной регулировки длительности t_2 , что является важным для практического использования метода (подстройка извещателя на срабатывание от заданной температуры, компенсация технологического разброса $\tau_{\text{ннз}}$).

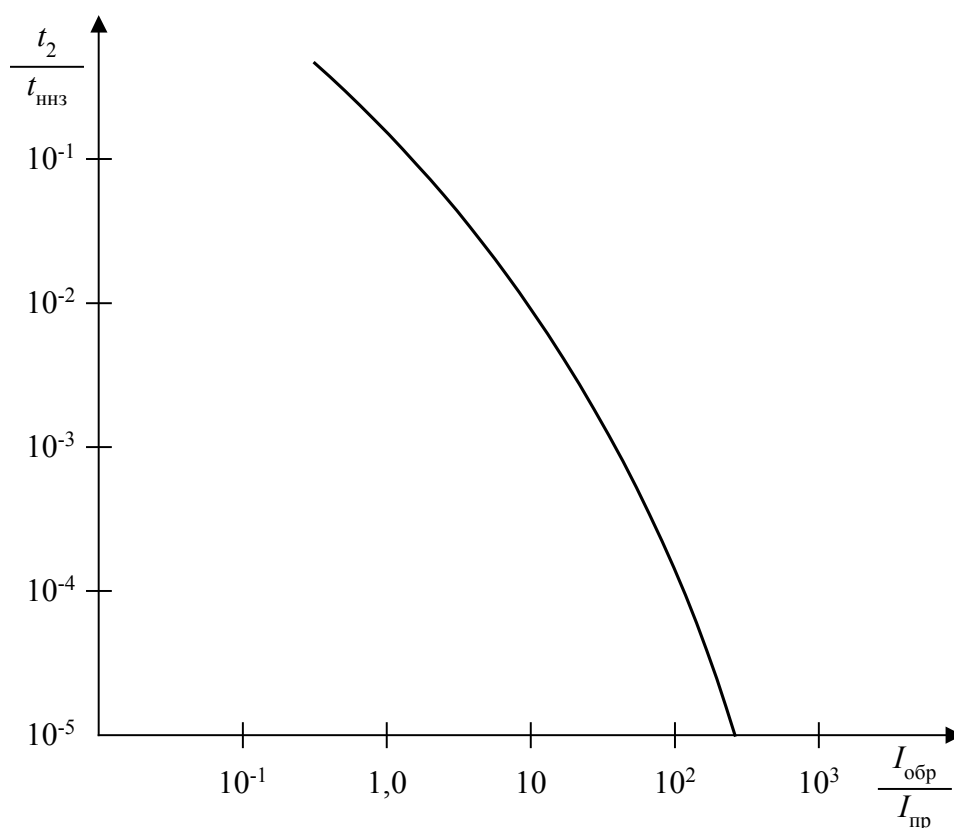


Рис. 3.29. Зависимость длительности t_2 фазы высокой обратной проводимости от режима переключения

Длительность протекания прямого тока t_1 выбирается из условия установления стационарного распределения неосновных носителей заряда в базах полупроводникового диода и должна быть гораздо больше $\tau_{\text{ннз}}$. Реально для низкочастотных маломощных выпрямительных диодов разных типов величина времени жизни находится в пределах от долей мкс до нескольких мкс. Следовательно, весь цикл измерения t_2 фазы высокой обратной проводимости с учётом его возрастания при воздействии повышенной температуры будет составлять не более 1 мс.

Известно, что частота измерения температуры окружающей среды тепловым извещателем определяется скоростью протекания тепловых процессов при возникновении очага пожара и должна составлять величину от долей герца до нескольких Гц. Большая скважность (> 100) при импульсном режиме измерения длительности фазы высокой обратной проводимости позволяет покрыть тепловой извещатель с малой потребляемой мощностью.

Тепловая инерционность чувствительного элемента определяется теплопроводностью полупроводникового материала и материала защиты, массой полупроводникового диода датчика, тепловым сопротивлением кристалл – окружающая среда. Современные методы создания бескорпусных кремневых полупроводниковых приборов с защитой кремний-органическими и эпоксидными компаундами обеспечивают тепловое сопротивление кристалл – окружающая среда не более 2-4 °С/мВт [3.18]. Это позволяет изготовить датчики температуры с малой тепловой инерционностью.

На рис. 3.30 приведена структурная схема теплового извещателя, разработанного на основе рассмотренного выше датчика температуры [3.19].

Извещатель работает следующим образом. При температуре, ниже установленной пороговой, блок 3 формирует контрольный импульс, длительность которого не превышает импульс, подаваемый на блок 4 сравнения с выхода формирователя 1. В этом случае на выходе блока 5 будет присутствовать сигнал, свидетельствующий о нормальной температуре объекта. При превышении температуры порогового значения длительность импульса, поступающего с выхода формирователя контрольного импульса начинает превышать длительность эталонного импульса, и на выходе блока сравнения 4 появляется сигнал, вызывающий формирование выходным блоком 5 извещения о пожаре.

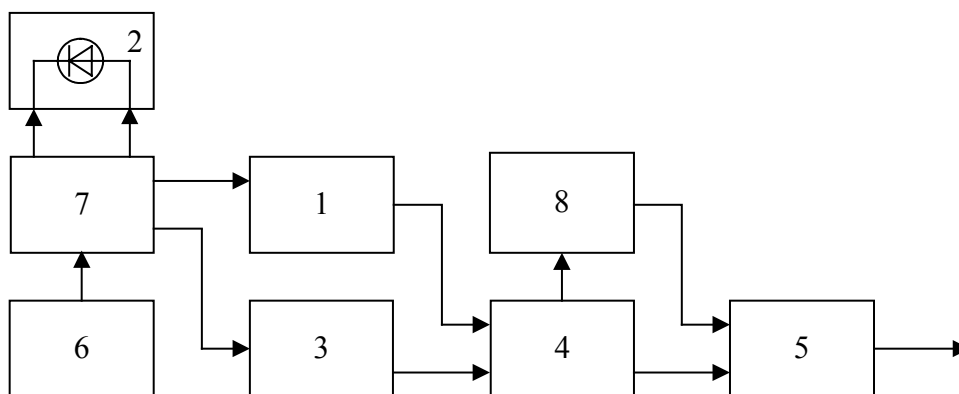


Рис. 3.30. Структурная схема теплового полупроводникового извещателя:

- | | |
|---|--|
| 1 – формирователь эталонного импульса; | 5 – выходной блок; |
| 2 – полупроводниковый чувствительный элемент; | 6 – генератор; |
| 3 – формирователь контрольного импульса; | 7 – формирователь управляющих импульсов; |
| 4 – блок сравнения; | 8 – блок контроля |

Исправность всех блоков пожарного извещателя контролируется блоком 8 контроля по наличию периодических импульсов, поступающих в него с блока сравнения синхронно с импульсами формирователей 1 и 3. В случае нарушения нормальной работы блоков извещателя (неисправность генератора, повреждение линии питания чувствительного элемента, который может быть конструктивно выполнен в виде отдельного датчика) периодические импульсы на входе блока контроля 8 исчезают, одновременно исчезает и управляющий сигнал на втором входе блока 5, что приводит к появлению на его выходе извещения о повреждении извещателя. Принцип действия извещателя позволяет использовать одновременно несколько чувствительных элементов (датчиков), что увеличивает контролируемую площадь объекта.

Проведённая проверка работоспособности экспериментального образца извещателя дала следующие результаты. Средний ток потребления при частоте контроля длительности фазы высокой обратной проводимости 2 Гц не превышал 0,3 мА при напряжении питания 9 В. В качестве чувствительного элемента датчика температуры извещателя был использован кристалл кремневого выпрямительного диода Д226Б. Тепловая инерционность образца извещателя, измеренная по ГОСТ 17592-72 при скорости теплового потока 1,25 м/с составляла менее 3 с. В процессе испытаний осуществлялась плавная перестройка температуры срабатывания в диапазоне температур 313 - 393 К (от +40 до + 125 °С).

3.7. Извещатель на основе новых термочувствительных материалов

В результате проведённых исследований определена возможность создания бесконтактного теплового извещателя, использующего новые перспективные проводящие материалы [3.12]. Структура чувствительного элемента такого извещателя представлена на рис. 3.31 [3.20]. На рис. 3.32 изображена температурная зависимость сопротивления экспериментального образца извещателя $R_{и} = f(T)$.

Чувствительный элемент представляет собой трехслойную пластину, первый слой которой 1 выполнен из материала с высокой теплопроводностью и большим удельным электрическим сопротивлением, например Al_2O_3 . Средний слой 2 выполнен из материала $YBa_2Me_3Se_7$, где Me – один из металлов: Cu, Ag или Au. Третий слой 3 представляет собой изолятор, устойчивый к агрессивному воздействию внешней среды, например SiO_2 .

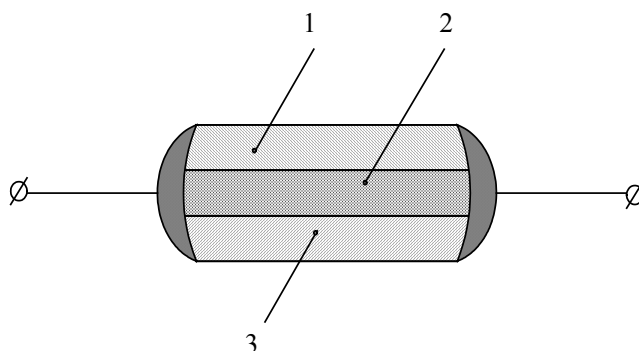


Рис. 3.31. Чувствительный элемент теплового извещателя

Принцип действия извещателя основан на резком и многократном (на 5-6 порядков) увеличении электрического сопротивления чувствительного элемента при превышении температуры окружающей среды определенного порогового уровня. Для композиционного материала $YBa_2Me_3Se_7$ температура перехода составляет 99 ± 1 °C [3.20]. При этой температуре в кристаллических решетках материала возникает селенид-ион Se_2^{2-} , который разрушает эффект бездиссоциативного переноса носителей заряда через композиционную структуру Y-Ba-Me-Se. Наличие этого физического эффекта и определяет изменение сопротивления всей структуры чувствительного элемента извещателя.

При работе извещатель включается последовательно в двухпровод-

ную электрическую цепь (шлейф сигнализации), его нормально низкое сопротивление свидетельствует об отсутствии пожара на контролируемом объекте.

В случае пожара повышение температуры среды выше порогового значения вызывает увеличение сопротивления чувствительного элемента, приводящему к формированию тревожного извещения.

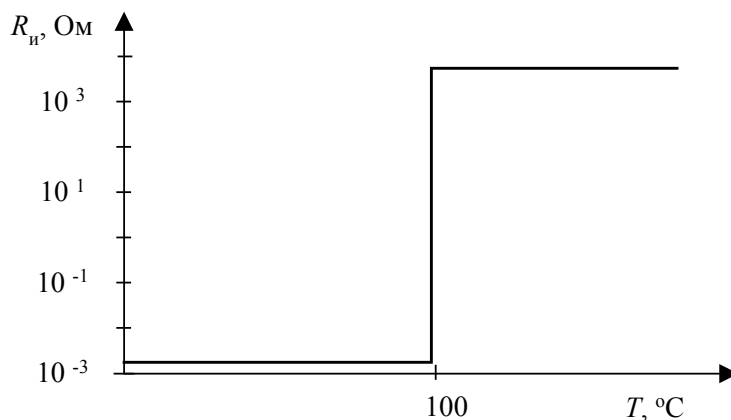


Рис. 3.32. Зависимость сопротивления извещателя от температуры

Небольшие размеры чувствительного элемента определяют малую инерционность теплового извещателя, что позволит эффективно использовать его на различных объектах.

Литература

Глава 3

3.1. **Членов А.Н.** Современные тепловые пожарные извещатели: основные характеристики и особенности применения // Системы безопасности, №1 (55), февраль-март. –М.: Гротек, 2004. –С.43-50.

3.2. **Буцынская Т.А., Землянухин М.В.** Метод повышения эффективности теплового пожарного извещателя // Материалы тринадцатой научно-технической конференции "Системы безопасности" – СБ-2004. –М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. –С. 225-229.

3.3. **Буцынская Т.А., Землянухин М.В.** Применение дополнительных информационных признаков для повышения эффективности обнаружения пожара.

3.4. **Буцынская Т.А., Землянухин М.В.** Статистический подход при анализе методов повышения эффективности пожарных извещателей // Материалы XIX научно-практической конференции "Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений" Часть 3. –М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2005. –С.177-182.

3.5. **Буцынская Т.А., Землянухин М.В.** Алгоритм выбора теплового пожарного извещателя по температуре срабатывания Материалы четырнадцатой научно-технической конференции "Системы безопасности" – СБ-2005. –М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. –С. 234-237.

3.6. **Членов А.Н., Ватагин В.С.** Перспективы применения жидкокристаллических материалов в системах пожарно-охранной сигнализации // Материалы восьмой международной конференции "Системы безопасности" – СБ-99. –М.: МИПБ МВД России, 1999. –С.67-68.

3.7. **Chlenov A., Vatagin V.** LC Fire and Smoke Detectors / In the Book of 18th International Liquid Crystal Conference. – Sendai, 2000.

3.8. **Членов А.Н.** Электроустановки тревожной сигнализации в пожаро-взрывоопасных зонах // Системы безопасности, № 1 (43), февраль-март. –М.: Гротек, 2002.

3.9. **Фомин В.И.** Перспективные средства пожарной сигнализации // Противопожарные и аварийно-спасательные средства, № 2, 2006. –С.42-44.

3.11. **Бабуров В.П., Мавлянкариев Б.А., Фомин В.И.** Разработка пленочных тепловых пожарных извещателей // Научно-практическая конференция "Пожарная безопасность – 97". –М.: МИПБ МВД РФ, 1997.

3.12. **Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Членов А.Н.** Принцип построения теплового пожарного извещателя // Материалы восьмой международной конференции "Системы безопасности" – СБ-99. –М.: МИПБ МВД России, 1999. –С.175-177.

3.13. Патент на изобретение РФ № 2275688. "Тепловой пожарный извещатель" (**Членов А.Н., Буцынская Т.А., Землянухин М.В.**) кл. МКИ G 08 В 17/00 от 30.01.2004.

3.14. А.С. № 1282179 (СССР). "Пожарный извещатель" (**Юсупбеков Н.Р., Мавлянкариев Б.А., Фомин В.И., Бибишев Р.А.**) кл. МКИ G 08 В 17/00 от 8.09.86.

3.15. А.С. № 1485039 (СССР). "Индикатор температуры" (**Юсупбеков Н.Р., Мавлянкариев Б.А., Фомин В.И.**) кл. МКИ G 01 К 11/12 от 8.02.89.

3.16. А.С. № 1786497 (СССР). "Пожарный извещатель" (**Юсупбеков Н.Р., Мавлянкариев Б.А., Фомин В.И.**) кл. МКИ G 08 В 17/12 от 8.09.92.

3.17. Патент № 2200 (Республика Узбекистан). "Тепловой пожарный извещатель" (**Мисюченко Т.В., Фомин В.И.** и др.) кл. МКИ G 08 В 17/06 от 8.09.94.

3.18. **Членов А.Н., Метелеин Г.А., Бычков О.В.** Использование эффекта температурной зависимости времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводниках для построения пожарного извещателя // Охранно-пожарная сигнализация: Сб. научн. тр. –М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983.

3.19. Патент на изобретение РФ № 922834 от 21.12.81. "Тепловой пожарный извещатель" (**Членов А.Н., Бычков О.В., Метёлкин Г.А.**) кл. МКИ G 08 В 17/00 от 21.12.81.

3.20. Патент на изобретение РФ № 2181505 от 29.04.02 г "Тепловой пожарный извещатель" (**Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Членов А.Н.**) кл. МКИ G 08 В 17/00 от 29.04.02.