

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ СХЕМОТЕХНИКИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ: ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЧЕСКАЯ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИЯ, ПИТАНИЕ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В статье обсуждаются вопросы совершенствования тензорезистивных датчиков давления (ДД) с учетом их совместного использования с современными достижениями волоконной оптики (ВО). Рассматриваются возможности реализации и особенности ВО пирометрической компенсации температурной погрешности полупроводниковых и резистивных тензорезисторов, оптического и/или электрического нагрева тензорезистора для самокалибровки ВО пирометра, питания оптическим излучением, передаваемым по световоду с гальванической развязкой схемы ДД, повышения помехоподавления и пожаровзрывобезопасности.

Ключевые слова: тензорезистор, сульфид самария, пирометр, халькогенидный световод, питание оптическим излучением, пожаровзрывобезопасность, фазо-цифровое преобразование.

Введение. Измерение давления разных сред — одна из важных измерительных задач в ракетно-космическом, авиационном, химическом и нефтегазовом машиностроении, составляющих основу ВПК и ТЭК России. Доля датчиков давления (ДД) на рынке, как правило, составляет до 40 % всего объема, большая часть из которых является тензорезистивными. К настоящему времени методы и средства тензометрии достаточно изучены [1–7], но новый импульс ее развития в России был обусловлен созданием и началом использования полупроводниковых тензорезисторов на основе моносulfида самария (SmS), обладающих помимо высокой тензочувствительности еще и высокой радиационной стойкостью, линейной зависимостью температурного коэффициента сопротивления и другими достоинствами [6, 7].

Представляется, что потенциал совершенствования тензометрии этим еще не исчерпан. Со времен СССР еще сохранилась некоторая научно-технологическая преимущество в технологиях производства тензорезисторов, дела

их достаточно дешевыми и доступными. Возможные импульсы для развития тензометрии можно получить в смежных направлениях технической физики, например, связанных с оптикой, а именно волоконной оптикой (ВО). Такие новые направления могут быть связаны со следующими возможностями:

1) компенсации температурной погрешности тензорезисторов (в дальнейшем — термокомпенсация) с помощью пирометра, в т.ч. с ВО каналом;

2) самокалибровки пирометра для обеспечения высокой точности измерений температуры при активном оптическом и/или электрическом нагреве тензорезистора ДД;

3) питании схемы ДД оптическим излучением, передаваемым по оптическому волокну, с обеспечением гальванической развязки, повышением помехоподавления и пожаровзрывобезопасности (ПВБ).

Все эти вопросы в открытой печати ранее не рассматривались, и данная работа, открывая серию тематических публикаций, направлена на восполнение этого недостатка.

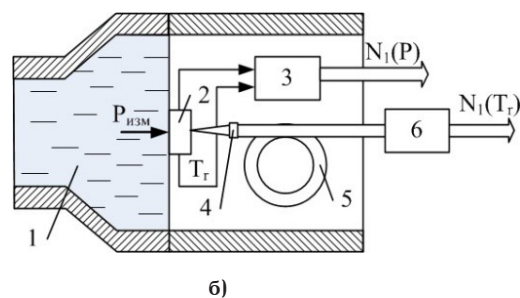
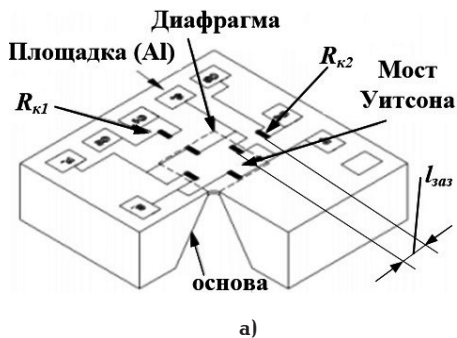


Рис. 1. Варианты термокомпенсации: с помощью компенсационных терморезисторов, установленных на мембране с зазором $l_{\text{заз}}$ относительно тензорезистора(ов) (а) [5], измерение температуры ВО пирометром непосредственно на тензорезисторе (б)

1. Возможности измерения температуры тензорезистора ВО пирометром. Для большинства современных тензорезистивных ДД использование средств термокомпенсации чувствительных элементов становится почти обязательным условием достижения высокой точности измерений [4, 5]. Применение самотермокомпенсированных тензорезисторов возможно, но ограничено разными причинами, например, низкой тензочувствительностью, температурным диапазоном, влиянием радиальной и тангенциальной составляющих деформации на конечные размеры базы тензорезисторов и различием температурных коэффициентов линейных расширений материалов мембраны и чувствительного элемента.

В электронных средствах термокомпенсации погрешности вызваны как неидеальностью ее электронной схемы, так и образованием зазора $l_{\text{заз}}$ с соответствующим тепловым сопротивлением между вводимым термозависимым элементом (в дальнейшем — терморезистор) и многослойной конструкцией тензорезистора с клеевой прослойкой (рис. 1) и критично для температурно-динамических процессов.

В ДД резистивный тензорезистор устанавливают на мембрану, формируя тепловую цепь между ним и терморезистором: резистивный тензорезистор → подложка на клеевой основе → два слоя клея → мембрана → терморезистор. Поэтому суммарное тепловое сопротивление $R_{\Sigma 1}^t$ между резистивным тензорезистором и терморезистором можно записать формулой:

$$R_{\Sigma 1}^t = R_{\text{пг}}^t + R_{\text{кл}}^t + R_{\text{мем}}^t, \quad (1)$$

где $R_{\text{пг}}^t$, $R_{\text{кл}}^t$, $R_{\text{мем}}^t$ — тепловые сопротивления подложки, клея и мембраны. Подложка резистивного тензорезистора, как правило, выполняется на клеевой основе, допуская условие $R_{\text{пг}}^t \approx R_{\text{кл}}^t$ и позволяя изменить формулу (1) к виду:

$$R_{\Sigma 1}^t = 3R_{\text{кл}}^t + R_{\text{мем}}^t, \quad (2)$$

В ДД с п/п тензорезистором, как правило, образуется другая тепловая цепь: п/п тензорезистор → один слой клея → мембрана → терморезистор. И тогда суммарное тепловое сопротивление $R_{\Sigma 2}^t$ между п/п тензорезистором и терморезистором можно записать формулой:

$$R_{\Sigma 2}^t = R_{\text{кл}}^t + R_{\text{мем}}^t, \quad (3)$$

Из-за такого технологического образования суммарных тепловых сопротивлений $R_{\Sigma 1}^t$ и $R_{\Sigma 2}^t$ для резистивного и п/п тензорезистора соответственно может появиться разница температур между тензорезистором и терморезистором до нескольких градусов, формируя некомпенсированную дополнительную температурную погрешность, ухудшающую точность измерения ДД.

В связи с этим повышение точности измерений температуры тензорезистора может быть достигнуто за счет введения прецизионного инфракрасного (ИК) ВО радиометра (в дальнейшем — пирометр). Он позволяет обеспечить высокую пространственную локализацию, измеряя температуру непосредственно на тензорезисторе, исключая вышеупомянутые тепловые сопротивления с более точной термокомпенсацией [8–11]. Особенности использования ВО пирометров при совместной работе с ДД рассмотрены далее.

1.1. Современные пирометры для пирометрической термокомпенсации в ДД. Современные темпы роста степени интеграции электронных устройств позволяют предположить уменьшение габаритов пирометра настолько, что уже вероятно технологически возможно (или станет возможным в ближайшем будущем) создание пирометра встроенного в корпус ДД. Это позволит упростить схему и исключить использование световода для передачи ИК-излучения. Однако в данной статье будем рассматривать более традиционный вариант использования пирометра, вынесенного за пределы ДД в комплекте со световодом, передающим ИК-излучение от тензорезистора к пирометру.

Основные характеристики современных высокоточных пирометров приведены в табл. 1, в соответствии с которой погрешность современных высокоточных пирометров обычно не более 1 % [10, 11], 0,1 °C в диапазоне от 10 до 45 °C [8], а разрешающая способность достигает значения ~ 25 мК и временем отклика (90 % сигнала) 150 мс [9].

1.2. Световоды для ВО пирометра, фокусировка оптического потока. Для обеспечения совместной работы пирометра с ДД лучшими следует

Основные характеристики современных высокоточных пирометров

№	Название пирометра	Диапазон измерения, °С	Погрешность измерений, °С (%)	Разрешающая способность, °С	Время измерений, с (для %-ной доли сигнала)
1	Опволоконный ИК радиометр (Россия) [8]	+ 10 ... + 45	0,1	нет данных	1,0
2	ИК радиометр (Россия) [9]	+ 10 ... + 50	0,1	0,025	0,2 ... 5
3	Пирометр Optiris CX hs LT (Германия) [10]	- 20 ... + 150	1,0 (1,0)	0,025	150 мс (90%)
4	Raytek Compact CM (США) [11]	- 20 ... + 500	2,0 (1,5)	0,1	150 мс (90%)

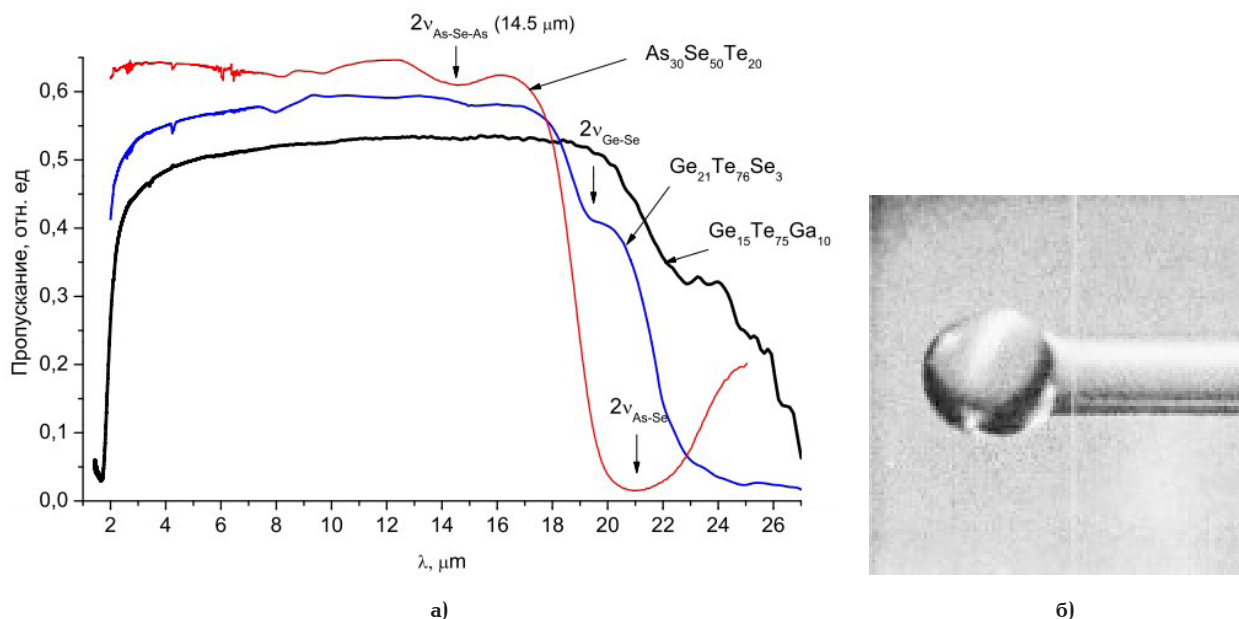


Рис. 2. Оптические и конструктивные особенности световодов ВО пирометра: спектры пропускания халькогенидных стекол (толщина 2 мм) (а): $As_{30}Se_{50}Te_{20}$, $Ge_{21}Te_{76}Se_3$ и $Te_{75}Ge_{15}Ga_{10}$ (взято из [12], и микролинза на торце световода (б) (взято из [13])

считать халькогенидные световоды, обладающие для ИК-излучения вероятно самым широким окном прозрачности: на основе стекол $As_{30}Se_{50}Te_{20}$, $Te_{76}Ge_{21}Se_3$ и $Te_{75}Ge_{15}Ga_{10}$, $Ge_{10}As_{30}Se_{38}Te_{22}$ — 2...15 мкм, $Ge_{20}Se_{80}$ — 2...10 мкм [12]. Графики окон прозрачности некоторых из этих стекол при толщине 2 мм показаны на рис. 2а.

Для обеспечения высокой пространственной локализации диаметр зоны измерения температуры $d_{изм}$ не должен превышать ширины рабочего тензорезистора $l_{шпр}$, достигающей значений до 0,1–0,5 мм:

$$d_{изм} \leq l_{шпр}. \quad (4)$$

Поэтому может возникать необходимость использования на торце световода фокусирующей микролинзы. Один из вариантов такой микролинзы, созданной на торце световода, в форме шара [13] показан на (рис. 2б).

1.3. Самокалибровка ВО пирометра. Расширение функциональных возможностей и повышение точности измерений ДД может быть ре-

ализовано за счет периодически осуществляемой самокалибровки пирометра в течение краткого периода времени, т.е. фактически в режиме оп-line и без выключения ДД и остановки контролируемого технологического процесса.

В основе этого лежит возможность измерения температуры тензорезистора, например, при импульсном нагреве, как показано на рис. 3, в периоды $[0; t_1]$, $[t_2; t_3]$, $[t_4; t_5]$ двумя способами:

1) при пропускании через него калиброванного электрического сигнала, преимущественно подобно описанному в [2];

2) нагрев тензорезистора оптическим излучением, подаваемом извне [14, 15].

В первом варианте можно использовать импульсный электрический сигнал с широтно-импульсной модуляцией, позволяющий управлением длительности импульса регулировать текущую среднюю температуру тензорезистора [2] с учетом сделанных для него предварительных калибровок.

Второй вариант нагрева тензорезистора подобен нагреву тонких пленок, основанных на их освещении подводимым извне оптическим из-

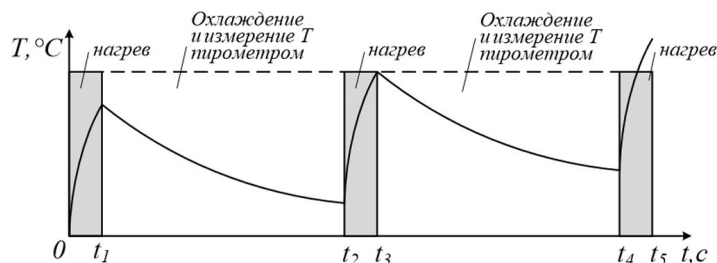


Рис. 3. Временная диаграмма импульсного режима нагрева и охлаждения тензорезистора для самокалибровки пирометра

лучением, преимущественно лазерным, подаваемым через световод от внешнего источника излучения (лазера) [14, 15].

Существенным достоинством использования многократной быстрой самокалибровки является возможность измерения температуры тензорезистора с точностью выше заявленных паспортных данных пирометра, фактически приближаясь к разрешающей способности, минимизируя возможные более медленные дрейфы и уходы электрических сигналов и параметров электронных устройств.

1.4. Расчет максимальной дополнительной температурной погрешности измерений $\Delta\Delta$. Применим вышеприведенные данные для оценки значений минимальной достижимой температурной погрешности $\Delta\Delta$ с учетом использования ВО пирометрической термокомпенсации.

Используем связь между входным давлением $P_{вх}$ $\Delta\Delta$ и сопротивлением тензорезистора $R_{мз}$ (для выбранного стандартного значения $R_{мз} = 800$ Ом и его изменениями $\Delta R_{мз}$) из константана, кремния и сульфида самария. Температурная погрешность $\Delta\Delta$ δ_t соответствует изменению сопротивления тензорезистора от температуры ΔR_t к полному диапазону изменения сопротивления тензорезистора ΔR_g [3]:

$$\delta_t = \Delta R_t \cdot 100 \% / \Delta R_g. \quad (5)$$

Числитель этой формулы можно определить выражением:

$$\Delta R_t = R_{мз} \cdot \alpha_t \cdot \Delta T_{нур}, \quad (6)$$

где α_t — температурный коэффициент сопротивления, ΔT — диапазон изменения температуры, определяемый для последующих расчетов погрешностью измерений (или разрешающей способностью) ВО пирометра $\Delta T_{нур}$.

Знаменатель формулы (5) можно рассчитать с помощью уравнения:

$$\Delta R_g = k_{мат} \cdot R_{мз}, \quad (7)$$

где $k_{мат}$ — относительные приращения сопротивления материала тензорезистора при воздействии давления.

С учетом уравнений (5)–(7) можно записать итоговое выражение для расчета ожидаемой температурной погрешности $\Delta\Delta$ δ_t :

$$\delta_t = \frac{\Delta R_t \cdot 100 \%}{\Delta R_g} =$$

$$= \frac{\alpha_t R_{мз} \cdot 100 \%}{k_{мат} \cdot R_{мз}} \Delta T_{нур} = \frac{\alpha_t \Delta T_{нур}}{k_{мат}} \cdot 100 \% . \quad (8)$$

Для этого выражения были рассчитаны значения температурной погрешности $\Delta\Delta$ δ_t с учетом сопротивлений тензорезисторов $R_{мз} = 800$ Ом со значениями $k_{мат} = 0,003; 0,14; 0,05$ и $\alpha_t = 50 \cdot 10^{-6}; 7,0 \cdot 10^{-4}; 50 \cdot 10^{-4}$ для константана, кремния и сульфида самария соответственно. В связи с тем, что обычно значения α_t для константана могут принимать и малые отрицательные значения, то дополним вышеприведенные три материала еще и константаном, отобранным специально с $\alpha_t = 10 \cdot 10^{-6}$. Кроме того, помимо стандартного сульфида самария также возможна его разновидность с допированием, т.е. с добавлением различных добавок, в частности, гадолинием (Gd). И, согласно [16], для этого варианта значение α_t может практически приближаться к нулю. Однако в расчетах для сульфида самария с допированием все-таки примем чуть большее значение: $\alpha_t \approx 1 \cdot 10^{-4}$. Таким образом, выбрано пять материалов: константан, константан отобранный, кремний, сульфид самария и сульфид самария с допированием Gd со значениями $\alpha_t = 50 \cdot 10^{-6}; 10 \cdot 10^{-6}; 70 \cdot 10^{-5}; 30 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-4}$ соответственно.

Результаты расчетов, проведенных по формулам (5)–(7), представлены в табл. 2, а на рис. 4 построены два графика зависимостей температурной погрешности $\Delta\Delta$ δ_t для пяти вышеуказанных материалов при $\Delta T_{нур} = 0,1$ °C (точность измерения, без самокалибровки) и $\Delta T_{нур} = 0,025$ °C (разрешающая способность при проведении самокалибровки) пирометра. Как видно, минимальная температурная погрешность $\Delta\Delta$ δ_t достигается при использовании сульфида самария с допированием Gd: 0,02 % и 0,005 % соответственно. Если принять, что все составляющие погрешности $\Delta\Delta$ независимы друг от друга и имеют нормальный закон распределения, то их суммирование должно осуществляться геометрически. Тогда температурной погрешностью $\Delta\Delta$ δ_t можно пренебречь лишь при упрощенном условии $\delta \approx 3\delta_t$, получая для вышеприведенных исходных данных две примерные предварительные оценки значения минимальной достижимой погрешности $\Delta\Delta$ δ : 0,06 % и 0,015 %. При других соотношениях, в т.ч. и при использовании других материалов, значение основной погрешности $\Delta\Delta$ δ будет больше. Полученные значения являются хорошим результатом, отражая достижение малой температурной погрешности $\Delta\Delta$ δ_t и эф-

Расчет температурной погрешности ДД δ_t для пяти материалов: константан, константан отобранный, кремний, сульфид самария и сульфид самария с допированием при $\Delta T_{\text{нпр}} = 0,1$ °С (без самокалибровки) и $\Delta T_{\text{нпр}} = 0,025$ °С (с самокалибровкой) пирометра

№	Материал	Температурный коэффициент сопротивления α_t , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Погрешность пирометра ¹ , разрешающая способность пирометра ² , °С	Относительное приращение сопротивления тензорезистора $k_{\text{нпр}}$, %	Температурная погрешность ДД δ_t , %
1	константан	0,00005	0,1 ¹	0,3	0,167
2	константан отобр.	0,00001	0,1 ¹	0,3	0,033
3	кремний	0,0007	0,1 ¹	14,0	0,050
4	сульфид самария	0,003	0,1 ¹	5,0	0,600
5	сульфид самария с допир.	0,0001	0,1 ¹	5,0	0,020
6	константан	0,00005	0,025 ²	0,3	0,042
7	константан отобр.	0,00001	0,025 ²	0,3	0,008
8	кремний	0,0007	0,025 ²	14,0	0,0125
9	сульфид самария	0,003	0,025 ²	5,0	0,150
10	сульфид самария с допир.	0,0001	0,025 ²	5,0	0,005

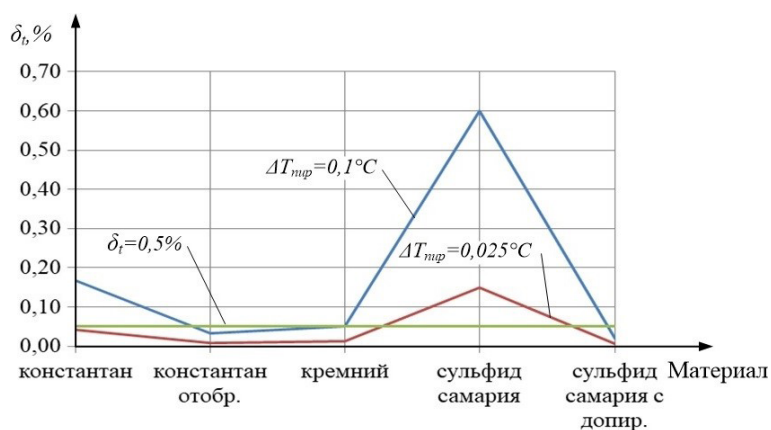


Рис. 4. Графики зависимостей температурной погрешности ДД δ_t для пяти материалов: константан, константан отобранный, кремний, сульфид самария и сульфид самария с допированием при $\Delta T_{\text{нпр}} = 0,1$ °С (без самокалибровки) и $\Delta T_{\text{нпр}} = 0,025$ °С (с самокалибровкой) пирометра

фективность использования термокомпенсации. Они могут быть еще снижены при дальнейшем уменьшении погрешности измерений $\Delta T_{\text{нпр}}$ (или разрешающей способности) ВО пирометра. Поиск путей достижения этого будет представлен в дальнейших публикациях.

2. Питание оптическим излучением, передаваемым оптическим волокном. Особенности построения ДД с гальванической развязкой. Формирование ВО связи между ДД и удаленными блоками естественно подталкивает к рассмотре-

нию возможности использования электрического питания оптическим излучением, передаваемым оптическим волокном (в дальнейшем — питание оптическим излучением). Подробно физико-технические основы для семейства подобных схемотехнических решений ранее были рассмотрены в [17–19]. Было показана эффективность преобразования энергии оптического излучения с длиной волны в диапазоне $\lambda = 790...830$ нм в электрическую энергию до 45 %. Однако для улучшения тактико-технических характеристик

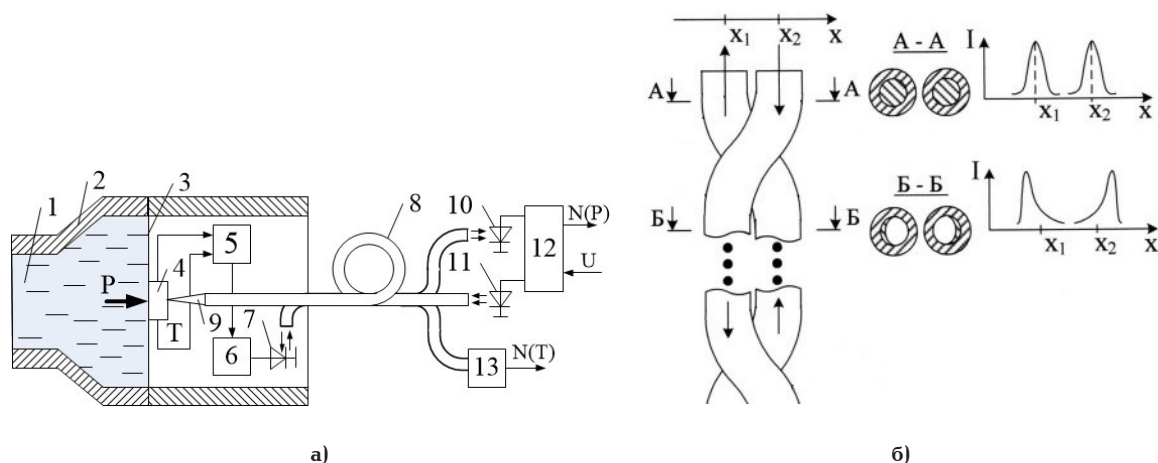


Рис. 5. Датчик давления: измерительная схема (а), спиральная структура ВО-канала для приемапередачи энергоинформационного оптического сигнала [17–19] (ВО-канал пирометрической термокомпенсации не показан), формирование потока сагиттальных лучей в сечениях А-А и Б-Б сердцевины световода на примере датчика уровня [21]

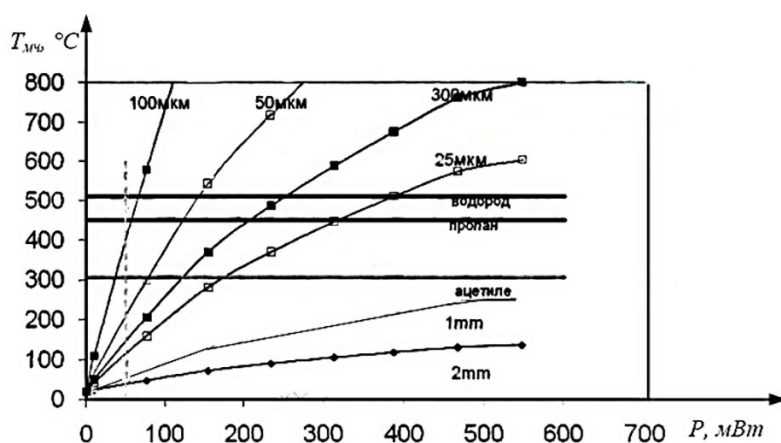


Рис. 6. График зависимости максимальной температуры разогрева микрочастицы $T_{мч}$ от мощности оптического излучения P , передаваемой световодом; вертикальная пунктирная линия соответствует значению $P_{пвб}$ формируя взрывобезопасную границу [19]

с целью применения в тензорезистивных ДД этот задел предполагает некоторую адаптацию, описание которой представлено далее.

Конструкция ДД с питанием оптическим излучением и ВО пирометром изображена на рис. 5а, на котором обозначены: рабочая среда 1, корпус 2, упругая мембрана 3, тензорезистор 4, измерительная схема 5, блок питания и управления 6, приемопередатчик 7, ВО-кабель (для измерительного оптического сигнала пирометра и приемапередачи энергоинформационного оптического сигнала) 8 со спиральной закруткой (рис. 5б), упругий конусообразный светопроводящий компаунд 9, приемник 10, передатчик 11, устройство управления 12, пирометр 13.

Для определения максимальной передаваемой оптической мощности $P_{пвб}$ в [19] была определена зависимость (рис. 6) максимальной температуры разогрева микрочастицы от мощности оптического излучения $P_{пвб}$, передаваемой световодом, с фиксацией подрыва водородно-воздушной сме-

си. В соответствии с этим была сформирована взрывобезопасная граница (вертикальная пунктирная линия на рис. 6). На основе этого была предложена формула для максимальной передаваемой оптической мощности $P_{пвб}$

$$P_{пвб} = k_{пвб} \cdot d_{св}^2 \quad (9)$$

где $k_{пвб}$ — коэффициент пропорциональности, который удобнее назвать «коэффициентом пожаровзрывобезопасности» с экспериментально определенной его оценкой $k_{пвб} = 0,5$ мВт/мкм.

Для повышения передаваемой мощности без ухудшения ПВБ предложены специальные технические приемы, описанные ниже [20]:

2.1. Спиральная закрутка оптического волокна. Изгиб световодов позволяет изменить траекторию движения оптических лучей и из лучей, пересекающих оптическую ось световода (меридиональные лучи), сформировать поток косых (сагиттальных) лучей (рис. 5б), распространя-

ющихся по ломаным и/или плавным винтовым спиральям [21].

Формирование нарастающего потока сагиттальных лучей показано на рис. 5б по двум сечениям А-А и Б-Б и в виде распределения света относительно оси световода. При этом за счет управления радиусом, шагом и углом спиральной закрутки можно достичь того, что при возникновении поперечной грани световода, например, в результате его обрыва для $\approx 85\text{...}90\%$ потока лучей будет выполняться условие полного внутреннего отражения, не позволяющее такой части общего потока выйти за пределы световода. На таких принципах строятся спиральные датчики уровня [21]. С учетом спиральной закрутки световода отношение мощностей максимального выходящего $P_{\text{вых}}$ к распространяющемуся с учетом обеспечения требований ПВБ $P_{\text{пвб}}$ оптических потоков записывается выражением (для идеально плоского поперечного торца):

$$k_{\text{воп}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{пвб}}} \quad (10)$$

Значение $k_{\text{воп}}$ обычно может находиться в диапазоне $0,11\text{...}0,18$ [20].

2.2. Нанесение металлического покрытия на световоды. Металлическое покрытие, нанесенное на внешнюю поверхность световода, позволяет повысить его механическую прочность, а также осуществить заземление для отвода накапливающегося электростатического заряда, тем самым уменьшая вероятность образования искры и повышая искробезопасность.

2.3. Контроль процесса трещинообразования световодов при измерении отраженного оптического потока. Появление и рост трещины поперек оси световода (или близко к этому) является критической ситуацией и сопровождается формированием кромок трещины, приводящих к появлению отраженного оптического потока $P_{\text{отр}}$ следующего в обратном направлении.

$$P_{\text{отр}} = P_{\text{пвб}} - P_{\text{вых}} \quad (11)$$

Таким образом, контроль процесса трещинообразования упрощенно может быть основан на текущем контроле значения коэффициента трещинообразования η , который можно определить как отношение мощности оптического потока, отраженного от трещины $P_{\text{отр}}$, к мощности распространяющегося по световоду с учетом обеспечения требований ПВБ $P_{\text{пвб}}$

$$\eta = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{пвб}}} = \frac{P_{\text{пвб}} - P_{\text{вых}}}{P_{\text{пвб}}} = \frac{P_{\text{пвб}} - k_{\text{воп}} \cdot k_{\text{тр}} \cdot P_{\text{пвб}}}{P_{\text{пвб}}} = (1 - k_{\text{воп}} \cdot k_{\text{тр}}) \quad (12)$$

где $k_{\text{тр}}$ — коэффициент, учитывающий неплоскостность (шероховатость) кромки трещины. Значение $k_{\text{тр}}$ может меняться в диапазоне от 0 до 1 для абсолютно плоской поверхности кромки и идеально диффузной рассеивающей поверхности соответственно. В последнем случае $R_z \approx \lambda$,

где R_z и λ — шероховатость кромки трещины световода и длина волны света. Но так как это оба крайне идеализированные случаи, то для реальной оценки значения η можно принять среднее значение $k_{\text{тр}} = 0,5$. И тогда для $k_{\text{воп}} = 0,15$ имеем $\eta \approx 0,9$. Это означает, что мощность отраженного излучения $P_{\text{отр}}$, которое можно использовать для контроля процесса трещинообразования, составит до 90 %. С учетом этого из световода наружу при трещине может выйти всего $\approx 10\%$ распространяющегося излучения, позволяя увеличить $P_{\text{пвб}}$ до ≈ 10 раз, т.е. до $\approx 250 - 300$ мВт на один световод.

С учетом 45 %-ной эффективности преобразования энергии оптического излучения с длиной волны в диапазоне $\lambda = 790\text{...}830$ нм в электрическую энергию максимальная мощность последней может составить $112,5\text{...}135$ мВт. И при напряжении питания 5 В максимальный ток потребления будет находиться в диапазоне $22,5\text{...}27$ мА.

2.4. Замкнутый ВО канал. Использование закрытого ВО канала за счет применения гибких и оптически прозрачных компаундов, в т.ч. с внешней защитной отражающей металлизацией исключит попадание пыли и других летучих легковоспламеняющихся компонентов в пространство излучатель — световод и световод — приемник.

2.5. Дублирование волоконно-оптических каналов. Дублирование волоконно-оптических каналов позволяет равномерно перераспределить передаваемый оптический сигнал по нескольким каналам с уменьшением нагрузки на каждый из них.

2.6. Помехоподавление при гальванической развязке схемы ДД.

Как следует из [22], уровень подавления индустриальных помех при подобной ВО гальванической развязке, которая, по сути, подобна удлинённому оптрону, может достигать значений не менее 100 дБ.

Заключение.

1. Использование ВО пирометра совместно с тензорезистивными ДД позволяет измерить температуру тензорезистора непосредственно и бесконтактно с высокой пространственной локализацией диаметром зоны $\varnothing \leq 0,1\text{...}0,5$ мм с точностью измерения не хуже $0,1\text{ }^\circ\text{C}$ и разрешающей способностью не хуже $0,025\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Осуществление электрического и/или оптического нагрева тензорезистора позволяет реализовать быструю самокалибровку пирометра, повысив точность измерения до значений, приближающихся к его разрешающей способности, минимизируя возможные более медленные дрейфы и уходы электрических сигналов и параметров электронных устройств.

3. Расчеты показывают, что минимальная температурная погрешность ДД δ_t достигается при использовании константана, отобранного: $0,02\%$ и $0,005\%$ при $\Delta T_{\text{нур}} = 0,1\text{ }^\circ\text{C}$ (без самокалибровки) и $\Delta T_{\text{нур}} = 0,025\text{ }^\circ\text{C}$ (с самокалибровкой) пирометра соответственно. В соответствии с этим предварительные оценки значения минимальной достижимой погрешности ДД δ могут составить $0,06\%$ и $0,015\%$ соответственно.

4. Формирование ВО связи между ДД и удаленными блоками позволяет реализовать возможность питания его оптическим излучением, передаваемым оптическим волокном. Такая конструкция ДД может быть использована во взрывоопасных зонах, работая с легковоспламеняющимися средами, осуществляя также гальваническую развязку для схемы ДД. Реализация специальных технических приемов в виде спиральной закрутки оптического волокна, нанесения металлического покрытия на световод, контроля процесса трещинообразования световодов при измерении отраженного оптического потока, создания замкнутого ВО канала и их дублирование позволяет увеличить мощность передаваемого оптического сигнала, доведя его значения до $\approx 250-300$ мВт на один световод. С учетом 45%-ной эффективности преобразования энергии оптического излучения с длиной волны в диапазоне $\lambda = 790...830$ нм в электрическую энергию максимальная мощность последней может составить 112,5...135 мВт. И при напряжении питания 5 В максимальный ток потребления будет находиться в диапазоне 22,5...27 мА.

Библиографический список

- Макаров Р. А., Ренский Л. Б., Боркунский Г. Х. [др.]. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1975. 287 с.
- Груздев С. В., Прошин Е. М. Импульсная тензометрия. Москва: Энергия, 1976. 89 с.
- Блокин-Мечталин Ю. К. Методы и средства построения высокоэффективных информационно-измерительных систем для исследования моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2020. 300 с.
- Волков В. С., Кучумов Е. В., Кикот В. В. Применение схемы на основе операционного усилителя для температурной компенсации полупроводникового тензорезистивного датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 4 (14). С. 42–50.
- Дробынин М. Е., Львов П. А., Львов А. А., Мельникова Н. И. Компенсация температурной погрешности пьезорезистивных датчиков давления с помощью полумостовой схемы: анализ метода // Надежность и качество: тр. междунар. симп. 2018. Т. 2. С. 85–88.
- Kaminskiy V. V., Stepanov N. N., Volodin N. M., Mishin Yu. N. Baroresistor effect and semiconductor thin film baroresistors based on samarium sulfide for spacecraft applications // Solar System Research. 2014. Vol. 48, no. 7. P. 561–567. DOI: 10.1134/S0038094614070107.
- Платов И. В., Леун Е. В., Чередов А. И., Мишин Ю. Н. Особенности контроля давления в трубопроводах двигательных установок космических аппаратов // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 78–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-78-83.
- Орлов И. Я., Афанасьев А. В., Никифоров И. А. Оптоволоконный прецизионный инфракрасный радиометр // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 5-3. С. 118–123.
- Орлов И. Я., Никифоров И. А., Афанасьев А. В. Беспроводной портативный инфракрасный радиометр для медико-биологических исследований // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. DOI: 10.7868/S0032816214050115.
- Инфракрасные термометры Optris CS laser hs LT. URL: <https://www.optris.ru/optris-cslaser-lt-hs> (дата обращения: 19.10.2021).
- Raytek Compact CM Infrared Temperature Sensor Series. URL: <https://www.raytek-direct.ca/product/raytek-rayucm-compact-cm-infrared-temperature-sensor-series> (дата обращения: 19.10.2021).
- Ширяев В. С., Вельмузов А. П., Караксина Э. В. [и др.]. Волоконно-оптические сенсоры на основе особо чистых халькогенидных стекол // Аналитика. 2020. Т. 10, № 4. С. 296–303. DOI: 10.22184/2227-572X.2020.10.4.296.303.
- Петров А. А. Лазерное формирование микролинз на базе оптических волокон: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2005. 112 с.
- Нефедьева К. Л., Харинцев С. С., Фишман А. И. [и др.]. Исследование фотоиндуцированного нагрева азополимерной пленки с помощью сканирующей тепловой микроскопии // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 17. С. 17–19.
- Тараканов Б. М. Воздействие лазерного излучения на структуру, термические и оптические свойства полиакрилонитрила // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1997. Т. 39, № 6. С. 972–976.
- Молодых А. А. Полупроводниковый сульфид самария и тензорезисторы на его основе: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2017. 128 с.
- Потапов В. Т., Соколовский А. А., Задворнов С. А. [и др.]. Гибридные измерительные системы с питанием оптическим излучением // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2016. Т. 6, № 4. С. 493–496.
- Задворнов С. А., Соколовский А. А. О пожаро- и взрывобезопасности волоконно-оптических гибридных измерительных систем // Датчики и системы. 2007. № 3. С. 11–14.
- Задворнов С. А. Исследование методов построения гибридных волоконно-оптических измерительных систем: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 119 с.
- Леун Е. В. Повышение пожаровзрывобезопасности электрических устройств РКТ, питаемых оптическим излучением, передаваемым оптическим волокном // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы XV Всерос. науч.-техн. конф., посвященной памяти главного конструктора ПО «Полёт» А. С. Клинышкова. Омск, 2021. С. 19–21.
- Патент РФ № 2573661 Российская Федерация, МПК G 01 F 23/22, G 01 F 23/292 Способ измерения уровня жидкости и устройство с нерегулярной биспирально-конической световодной структурой для его реализации (варианты) / Корнев М. С. № 2014111062; заявл. 24.03.14; опубл. 27.09.15, Бюл. № 27.
- Буткевич В. Х., Невзоров В., Абакумов А. Опыт схемотехнических решений гальванической развязки в устройствах ЦОС для лабораторных и промышленных применений. URL: <https://www.lcard.ru/articles/1> (дата обращения: 15.10.2021).

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина», г. Химки.
 SPIN-код: 6060-8056
 AuthorID (РИНЦ): 367560
 AuthorID (SCOPUS): 57200722184

СЫСОЕВ Валентин Константинович, доктор технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина».

SPIN-код: 5673-6495

AuthorID (РИНЦ): 565837

ШАХАНОВ Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина».

МИШИН Юрий Николаевич, начальник сектора АО «НПО Лавочкина».

SPIN-код: 1017-6421

AuthorID (РИНЦ): 819110

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В., Сысоев В. К., Шаханов А. Е., Мишин Ю. Н. Особенности современной схемотехники тензорезистивных датчиков давления: волоконно-оптическая пирометрическая термокомпенсация, питание оптическим излучением // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 56 – 64. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-180-56-64.

Статья поступила в редакцию 05.11.2021г.

© Е. В. Леун, В. К. Сысоев, А. Е. Шаханов,
Ю. Н. Мишин