

К. ф.-м. н. В. М. ГАБА

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»  
E-mail: granat@carat.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
16.12 2008 г.

Оппоненты д. ф.-м. н. С. Б. УБИЗСКИЙ (НУ «ЛП», г. Львов);  
д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ  
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ КРИСТАЛЛОВ

*Предложен принцип и представлены конструкторские решения для реализации поляризационно-оптического метода измерения температуры, основанного на температурных изменениях двулучепреломления кристаллов  $Al_2O_3$  и  $LiNbO_3$ .*

Наиболее распространенными и используемыми методами измерения температуры являются термоэлектрические контактные методы с использованием термопар и термометров сопротивления [1]. Однако в отдельных случаях точность таких измерений ограничена погрешностями, обусловленными температурными шумами и процессами, имеющими место в термодатчиках при высоких температурах. Размещение контактных термометров на объекте измерений также в большей или меньшей степени искажает его температурное поле и вызывает соответствующие погрешности, особенно в случаях, когда размеры термопары соизмеримы с размерами объекта исследований.

В промышленности широко применяются пирометры излучения, при использовании которых температурное поле объекта измерения не искажается. Однако здесь возникают трудности, связанные с влиянием лучеиспускательных характеристик объекта, характеристик промежуточной среды, излучения посторонних объектов на точность измерений. Пирометры служат, в основном, для измерения высоких температур, т. к. в области низких их использование проблематично из-за сильного влияния на них излучения окружающей среды, а для измерения температуры ниже  $-40^\circ\text{C}$  пирометры не пригодны вообще [2].

Поэтому проблема поиска принципиально новых методов определения температуры, в частности бесконтактных, повышение точности ее измерений актуальна и сегодня.

Одним из бесконтактных методов измерения температуры является оптический метод, базирующийся на изменении оптических свойств монокристаллов при их нагревании или охлаждении.

Целью настоящей работы было обоснование принципа действия и разработка схемы реализации термометрического устройства, основанного на явлении изменения оптических свойств двулучепреломляющих кристаллов под воздействием температуры.

### Теоретические основы метода

Если двулучепреломляющий кристалл поместить в среду, где необходимо измерять температуру, то ее изменение будет вызывать изменение показателя преломления и, соответственно, изменять разницу хода между обыкновенным и необыкновенным лучами. Интенсивность прошедшего через кристалл монохроматического поляризованного света имеет периодическую зависимость от температуры кристалла  $T$ :

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\pi d \Delta n(T)}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего светового потока;  
 $d$  — толщина кристалла вдоль луча;

$$\Delta n(T) = n'(T) - n''(T);$$

$n'(T), n''(T)$  — показатели преломления кристалла в кристаллофизических направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения;

$\lambda$  — длина волны излучения.

Таким образом, по изменению интенсивности светового потока при прохождении через нагреваемый (охлаждаемый) кристалл-датчик можно определять температуру среды, в которую помещен кристалл.

Принципиальная схема предлагаемого устройства для измерения температуры показана на рис. 1 [3, 4].

Параллельный монохроматический световой поток от источника проходит через поляризатор, компенсатор, термочувствительный кристалл, анализатор, узкополосный светофильтр и попадает на приемник

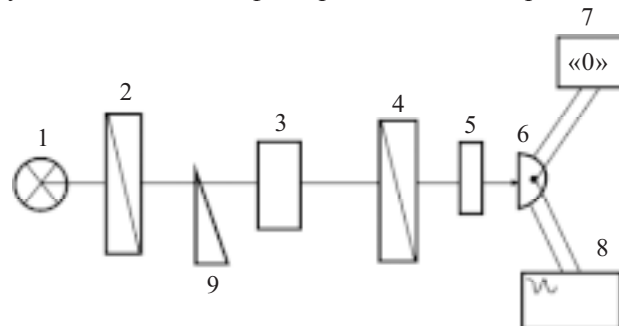


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для измерения температуры:

1 — источник монохроматического излучения; 2, 4 — поляризаторы; 3 — пластина двулучепреломляющего кристалла; 5 — узкополосный светофильтр; 6 — фотоприемник; 7 — нуль-индикатор; 8 — счетчик импульсов; 9 — компенсатор

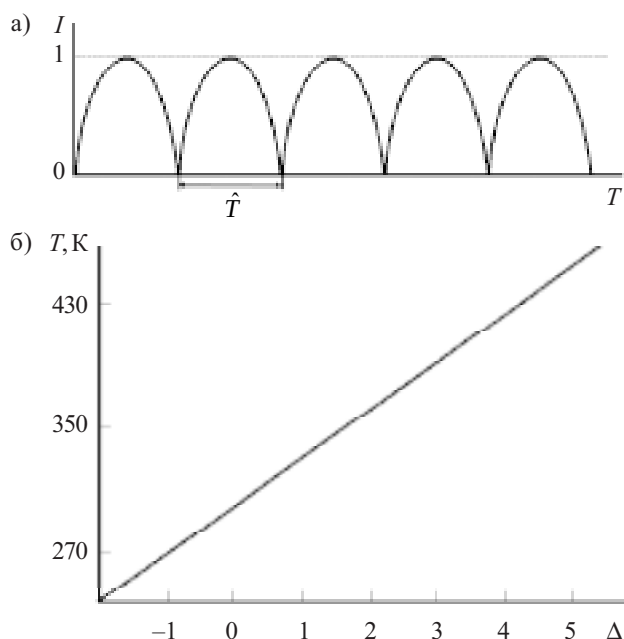


Рис. 2. Интенсивность света, регистрируемая приемником при изменении температуры двулучепреломляющего кристалла (а), и градуировочная зависимость термодатчика на основе кристалла сингенита (б)

излучения. Зависимость интенсивности падающего на приемник излучения от температуры схематично изображена на рис. 2, а. Ее можно получить следующим образом. Перед началом измерений при известной начальной температуре достигают минимальной освещенности фотоприемника и определяют величину минимального фототока. После этого термочувствительный элемент помещают в среду, где измеряется температура. С помощью компенсатора определяют прирост разности фаз световой волны, которая прошла через термочувствительный элемент, и по предварительно полученной градуировке в координатах «температура — разность фаз  $\Delta$ » определяют искомую температуру. Часть прироста разности фаз, кратную  $2\pi$ , определяют по числу минимумов фототока, а оставшуюся часть, меньшую, чем  $2\pi$ , определяют по разности показателей компенсатора, соответствующих первому и последнему измеренным минимумам фототока.

На рис. 2, б представлена градуировочная зависимость термодатчика на основе кристалла сингенита ( $K_2Ca[SO_4]_2 \cdot 4H_2O$ ) [5].

Представим зависимость (1) в виде

$$I(T) = I_0 \sin^2 \frac{\pi k}{\lambda} T, \quad (2)$$

где параметр  $k$  отображает разность фаз, возникающую вследствие изменения толщины и лучепреломления кристалла под действием температуры. Поэтому выражение (2) можно представить как

$$I(T) = I_0 \sin^2 \left[ \frac{\pi}{\lambda} \int_0^T \left\{ (n' - n'') \frac{\partial d}{\partial T} + d \frac{\partial (n' - n'')}{\partial T} \right\} dT \right]. \quad (3)$$

Очевидно, что некоторой величине фототока отвечает температура  $m\hat{T} + \Delta T$ , где  $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ;  $\Delta T$  — значение температуры, которое определяется по значению угла поворота компенсатора,  $\Delta T < \hat{T}$ ;  $\hat{T}$  — интервал температур (см. рис. 2, а), характерный для выбранного датчика (зависит от материала кристалла, ориентации его граней относительно кристаллографических осей, от его толщины), в котором интенсивность света проходит полный период. В связи с этим указанный интервал температур можно условно назвать периодом температуры. При  $k=\text{const}$   $\hat{T}$  не зависит от температуры, при  $k=k(T)$  — зависит.

Так как зависимость  $\hat{T}(T)$  учитывается при градуировании термодатчиков, для использования в них могут оказаться «неудобными» материалы, обладающие в рабочем диапазоне температур фазовыми переходами, в области которых, как правило, имеют место значительные аномалии свойств кристаллов, усложняющие и процесс градуирования, и вид кривой градуирования. С другой стороны, при создании приборов узкоцелевого назначения подобные резкие аномалии могут оказаться полезными.

Искомая температура среды может быть представлена как

$$T_x = T_0 + m\hat{T} + \Delta T \quad (4)$$

или

$$T_x = T_0 + A\delta, \quad (5)$$

где  $T_0$  — температура, при которой происходили настройки и запуск прибора;

$m$  — число минимумов фототока, зарегистрированных в диапазоне температур  $T_0 - T_x$ ;

$A$  — постоянная прибора (угол наклона прямой на рис. 2, б);

$\delta$  — разность фаз, обусловленная изменением температуры датчика.

Чувствительность предлагаемого устройства для измерения температуры зависит от физических свойств кристалла, его толщины и длины волны используемого излучения, от которых также зависит период  $\hat{T}$ , и чем меньше  $\hat{T}$ , тем выше чувствительность датчика.

В простейшем случае, когда период  $\hat{T}$  не зависит от температуры, он определяется по формуле

$$\hat{T} = \frac{\lambda}{d \frac{\partial (n' - n'')}{\partial T} + (n' - n'') \frac{\partial d}{\partial T}} \approx \frac{\lambda}{d \frac{\partial (n' - n'')}{\partial T}}, \quad (6)$$

где учтено, что для большинства материалов

$$d \frac{\partial (n' - n'')}{\partial T} \gg (n' - n'') \frac{\partial d}{\partial T}.$$

Таким образом, из формулы (6) следует, что в качестве термочувствительного элемента предлагаемого устройства следует использовать кристаллы с сильной температурной зависимостью лучепреломления, а для освещения использовать источник, имеющий как можно меньшую длину волны излучения. Период  $\hat{T}$  можно уменьшить за счет увеличения толщины термочувствительного элемента, однако при этом возрастает тепловая инерционность датчика и возникнут

нежелательные градиенты температуры. При небольшой толщине датчиков можно увеличить их эффективную толщину, обеспечив многоразовое прохождение луча через кристаллическую пластинку.

Повысить точность устройства можно, если использовать в качестве термочувствительного элемента двулучепреломляющий кристалл с зеркальной подложкой [4]. В таком случае оптический путь луча, проходящего сквозь термочувствительный элемент, возрастает вдвое, соответственно повышается точность определения или регулирования температуры. Необходимо также отметить, что оптическая схема, в которой используется явление отражения света, конструктивно может быть более выгодной, поскольку во многих случаях невозможно реализовать на практике прохождение света сквозь объект, температура которого определяется.

При использовании компенсатора Берека удастся измерять разность фаз до 0,01, а это значит, что точность измерения температуры составляет 0,01 K.

#### Реализация термометрического устройства

На рис. 3 приведена схема устройства для измерения температуры среды по интенсивности монохроматического света, прошедшего через оптически анизотропный (одноосный или двухосный) кристалл, помещенный в эту среду. Такое устройство имеет большую чувствительность и точность и позволяет измерять температуру при переходе от нагревания к охлаждению или наоборот.

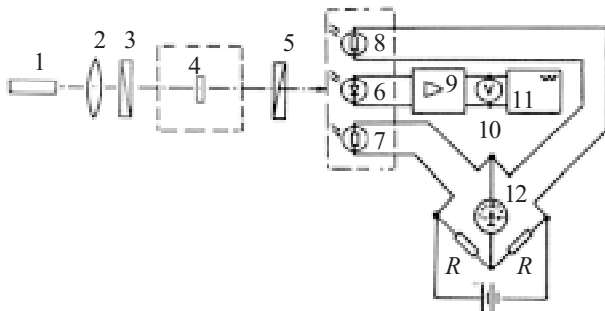


Рис. 3. Схема термометра на основе двулучепреломляющего кристалла:

1 — источник света; 2 — конденсорная линза; 3 — поляризатор; 4 — кристалл; 5 — анализатор; 6 — фотодиод; 7, 8 — фоторезисторы; 9 — усилитель постоянного тока; 10 — вольтметр; 11 — реверсивный счетчик импульсов; 12 — гальванометр

После прохождения монохроматического света от источника 1 через кристалл 4, расположенный в диагональном положении между скрещенными поляризаторами 3 и 5, на выходе (в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света) будет наблюдаться интерференционная картина (система минимумов и максимумов интенсивности света). Если в плоскости, где наблюдается интерференционная картина, разместить фотодиод 6, то он будет регистрировать интенсивность света, величина которой при изменении температуры кристалла будет изменяться согласно зависимости (1).

Контраст интерференционной картины обеспечивается конденсорной линзой 2. Сигнал от фотодиода 6

усиливается усилителем постоянного тока 9 и измеряется вольтметром 10. Таким образом, показания вольтметра 10 пропорциональны интенсивности света, который попадает на фотодиод 6. Полученная зависимость интенсивности света от температуры изображена на рис. 4.

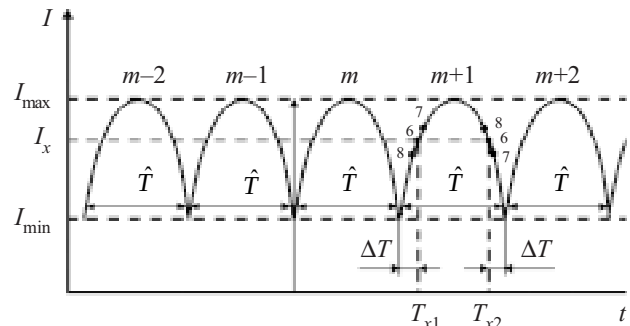


Рис. 4. Зависимость интенсивности света от температуры кристалла для схемы термометра на рис. 3

Реверсивный счетчик импульсов 11 фиксирует количество максимумов интенсивности света  $m$ , величину  $\Delta T$  определяют по показателям вольтметра 10, используя градуировочную таблицу «напряжение — температура».

Однако, как видно из рис. 4, одному значению интенсивности света  $I_x$ , которое регистрируется фотодиодом 6, отвечают две температуры —  $T_{x1}$  и  $T_{x2}$ . Для того чтобы их различить, в регистрирующей части устройства используются дополнительно два фоторезистора (рис. 5), размещенные с обеих сторон от фотодиода и включенные в плечи моста Уитстона. При таком размещении фоторезисторов и фотодиода свет, который попадает на них, будет иметь разную интенсивность, поскольку ее распределение в интерференционной картине имеет синусоидальный характер.

При изменении температуры интенсивность света, который попадает на фоторезисторы 7 и 8 и фотодиод 6, также изменяется по-разному. В первой половине характерного периода  $\hat{T}$ , когда интенсивность света, попадающего на фотодиод 6, при нагревании изменяется от минимума к максимуму, световой поток, который попадает на фоторезистор 7, больше свето-

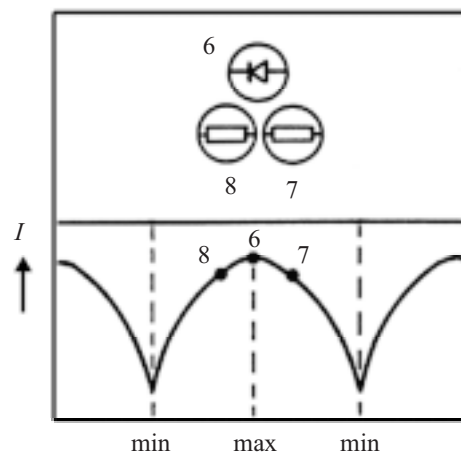


Рис. 5. Распределение света, попадающего на фоторезисторы (обозначения, как на рис. 3)

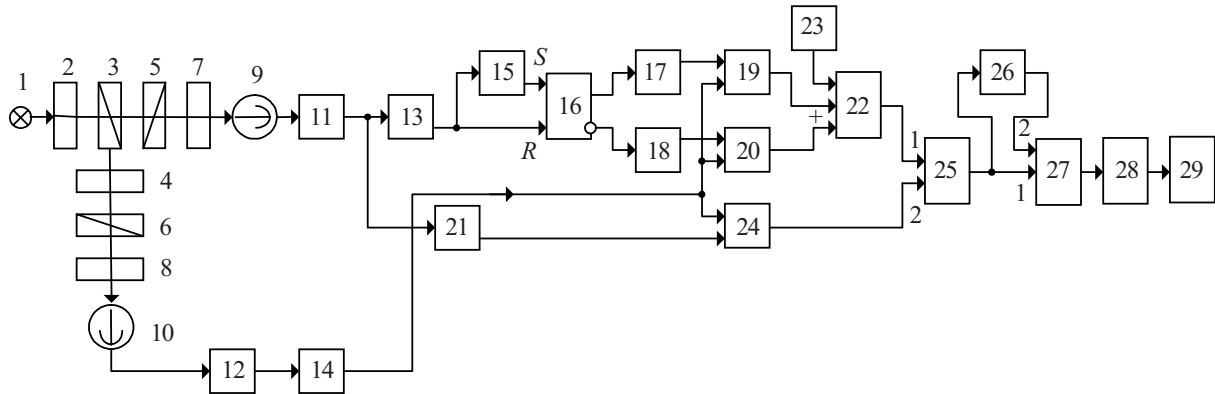


Рис. 6. Блок-схема автоматизированного цифрового измерителя температуры:

1 — источник монохроматического излучения; 2 — двулучепреломляющий кристалл; 3 — светоделительная пластина; 4 — фазовая пластина; 5, 6 — поляризаторы; 7, 8 — узкополосные светофильтры; 9, 10 — фотоприемники; 11, 12 — операционные усилители; 13, 14 — формирователи прямоугольных импульсов; 15 — инвертор; 16 — триггер; 17, 18 — дифференциальные цепи; 19, 20 — ключи; 21 — аналого-цифровой преобразователь; 22 — реверсивный счетчик; 23 — блок предварительной установки; 24, 26 — блоки памяти; 25, 27 — сумматоры; 28 — преобразователь «код-код»; 29 — блок индикации

вого потока на фоторезисторе 8. Соответственно, при изменении сопротивления фоторезисторов изменяется и соотношение сопротивлений в плечах моста Уитстона, и гальванометр 12 показывает положительное значение напряжения. Во второй половине периода, когда интенсивность света, попадающего на фотодиод 6, изменяется от максимума к минимуму, световой поток на фоторезисторе 7 меньше светового потока на фоторезисторе 8. Гальванометр в этом случае показывает отрицательное значение напряжения.

Таким образом, при положительном напряжении на гальванометре 12 значение искомой температуры среды составляет

$$T_x = T_0 + m\hat{T} + \Delta T, \quad (7)$$

а при отрицательном напряжении

$$T_x = T_0 + (m + 1)\hat{T} - \Delta T. \quad (8)$$

При переходе от нагревания к охлаждению или наоборот также используются значения показаний гальванометра 12. При нагревании кристалла знак напряжения на гальванометре 12 изменяется с «+» на «-», когда интенсивность света на фотодиоде 6 проходит через максимум (включается канал «суммирование» счетчика), а при охлаждении наоборот — «-» изменяется на «+» (включается канал «вычитание»).

Дальнейшее развитие идеи позволило разработать полностью автоматизированный цифровой измеритель температуры [6, 7], блок-схема которого приведена на рис. 6.

Монохроматический поляризованный луч от источника света 1 проходит сквозь двулучепреломляющий кристалл 2, попадает на светоделительную пластинку 3 и разделяется на два луча, причем один луч через поляризатор 5 и узкополосный светофильтр 7 попадает на фотоприемник 9, а другой, после прохождения через фазовую пластинку 4, поляризатор 6 и светофильтр 8, получает постоянный фазовый сдвиг  $\pi/2$  и попадает на фотоприемник 10. Электрические сигналы  $U_{\phi 1}$  и  $U_{\phi 2}$  на выходах фотоприемников 9 и 10 определяются квадратом амплитуды соответствующих оптических сигналов на их входах.

С выходов фотоприемников 9 и 10 электрические сигналы поступают на входы операционных усилителей 11 и 12, а с их выходов — на входы устройств формирования прямоугольных импульсов 13 и 14.

Если напряжение  $U_{\phi 1}$  опережает по фазе  $U_{\phi 2}$ , то реверсивный счетчик 22 работает в режиме суммирования, если же  $U_{\phi 1}$  отстает от  $U_{\phi 2}$  — то в режиме вычитания. С выхода устройства 13 сигнал поступает на вход инвертора 15 и на вход сбрасывания триггера 16, а с выхода инвертора 15 — на S-вход триггера 16. С прямого выхода триггера 16 сигнал поступает на вход дифференцирующей цепи 17, дифференцируется и поступает на первый вход ключевой схемы 19, а сигнал с инвертирующего выхода триггера 16 поступает на вход дифференцирующей цепи 18, дифференцируется и поступает на первый вход ключевой схемы 20. С выхода устройства формирования прямоугольных импульсов 14 сигнал поступает на параллельно соединенные вторые входы первой и второй ключевых схем, на младший адресный вход первого блока памяти 24, с выхода ключевой схемы 19 — на вход управления вычитанием реверсивного счетчика 22 и с выхода ключевой схемы 20 — на вход управления суммированием этого счетчика. На установочных входах счетчика в параллельном двоичном коде с помощью блока установки 23 установлено целое число периодов  $\hat{T}$  для известной исходной температуры.

Сигнал  $U_{\phi 1}$  с выхода операционного усилителя 11 также поступает на вход аналого-цифрового преобразователя 21, исходный двоичный параллельный код которого, начиная со второго, поступает на адресные входы блока памяти 24, причем количество используемых адресных входов зависит от числа дробных частей  $\Delta T$ , на которые необходимо делить период  $\hat{T}$ . С выхода реверсивного счетчика 22 параллельный двоичный код поступает на первый вход сумматора 25, а на второй вход — в параллельном двоичном коде с выхода блока памяти 24 значения  $\Delta T$ . С выхода сумматора 25 параллельный двоичный код поступает на адресный вход блока памяти 26 и на первый



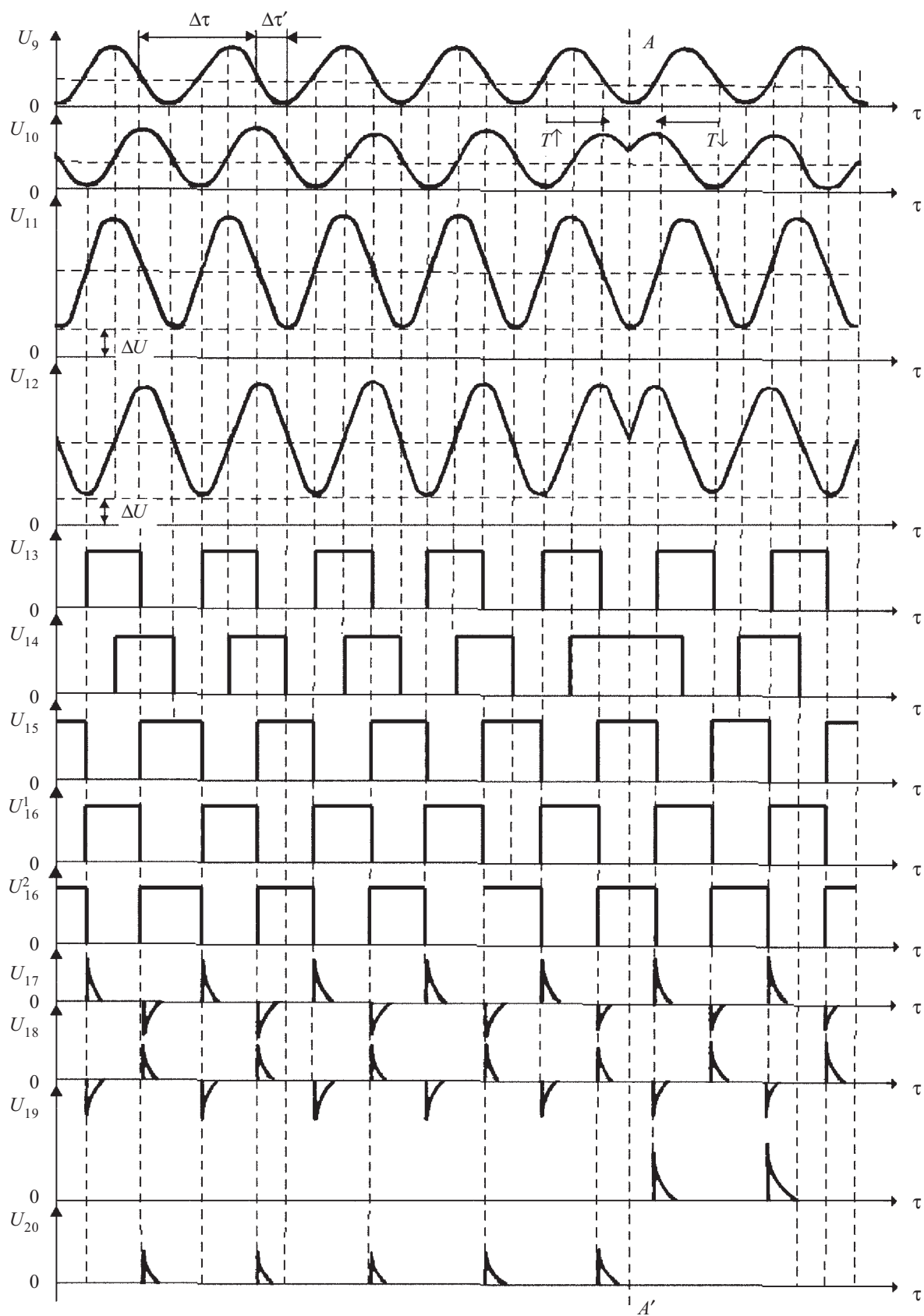


Рис. 7. Временные диаграммы работы автоматизированного цифрового измерителя температуры

вход сумматора 27, на второй вход которого в параллельном двоичном коде поступает число, записанное в блоке памяти 26, которое суммируется вторым сумматором 27 и дает число, соответствующее в двоичном коде значению температуры. Параллельный двоичный код с выхода сумматора 27 поступает на вход преобразователя «код-код» 28 в двоично-десятичном коде, с выхода которого поступает на вход блока индикации 29, показывающего значение температуры в градусах.

На рис. 7 приведены временные диаграммы напряжений, снимаемых с соответствующих преобразователей предложенного измерителя температуры.

На диаграммах сделаны следующие обозначения. На диаграмме  $U_9$ :  $\Delta t$  — период изменения выходного напряжения, снимаемого с преобразователя 9, отвечающий периоду изменения температуры кристалла;  $\Delta t'$  — смещение фазы сигнала на  $1/8$  периода при изменении температуры кристалла. На диаграмме  $U_{10}$ :  $T\uparrow$  и  $T\downarrow$  условно обозначают направления возрастания или уменьшения температуры кристалла. На диаграммах  $U_{11}$  и  $U_{12}$ :  $\Delta U$  — напряжения смещения, необходимые для работы в области положительных значений напряжений. Линия  $AA'$  обозначает условный момент времени, когда ход температуры изменяется от возрастания к уменьшению или наоборот.

Следует отметить, что в описанных выше устройствах для измерения и регулирования температуры оптическим методом в качестве термодатчиков, в принципе, может использоваться любой монокристаллический материал, который обладает двойным лучепреломлением. Главными факторами, которые определяют возможность использования монокристалла как термодатчика, являются его область прозрачности, величина двулучепреломления, величина изменения двулучепреломления с изменением температуры и температурный интервал существования самого материала и его двулучепреломляющих свойств.

#### Использование монокристаллов лейкосапфира и ниобата лития

Сегодня в зависимости от диапазона измеряемых температур и свойств среды, в которой размещается термодатчик, а также требований к точности измерений, может применяться очень широкая гамма монокристаллических материалов, которые синтезируются в промышленно-лабораторных условиях, как например монокристаллы  $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$  [6]. Перспективным является использование термодатчиков на основе монокристаллов лейкосапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) [8], которые выращиваются в промышленных масштабах [9, 10]. К положительным свойствам  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{LiNbO}_3$  в данном случае следует отнести их достаточно большие значения величины двулучепреломления и широкий температурный диапазон существования. Рассмотрим свойства кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{LiNbO}_3$  с точки зрения их применения в качестве датчиков температуры.

Кристаллы лейкосапфира обладают уникальной прочностью, химической стойкостью, не имеют фазовых переходов до температуры  $2000^\circ\text{C}$  [9], что делает их весьма привлекательными для использования в качестве датчиков в разнообразных оптических устройствах. Технологический процесс позволяет получать слитки кристаллов с оптическими свойствами, однородными по всему объему.

Исследования дисперсионных зависимостей показателей преломления кристаллов лейкосапфира проводились в [11—13]. Для определения температурных изменений показателей преломления кристаллов в [12—14] на основе измерений при фиксированных температурах были проведены оценки прироста показателя преломления  $n$  с изменением температуры и сделано допущение, что температурная зависимость  $n(T)$  носит линейный характер. Авторы [15] провели непосредственные исследования изменений показателя преломления кристаллов лейкосапфира на волнах длиной 546,1 и 579,1 нм в диапазоне температур от 20 до  $1000^\circ\text{C}$ . Было установлено, что с достаточной точностью можно считать изменения показателя преломления с температурой линейными, а температурные коэффициенты  $dn/dT$  в интервале температур 20— $700^\circ\text{C}$  составили соответственно  $1,37 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  для  $\lambda=546,1 \text{ нм}$  и  $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  для  $\lambda=579,1 \text{ нм}$ . Из приведенных данных видно, что кристаллы лейкосапфира могут быть использованы в качестве датчиков при измерении температуры.

Для градуировки термочувствительного элемента в координатах «температура — порядок максимума интенсивности» применялось следующее устройство (рис. 8). Полированная пластина 1 из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , вырезанная так, чтобы оптическая ось кристалла лежала в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, размещалась в нагревательном устройстве 2. При этом направлении оптической оси со-

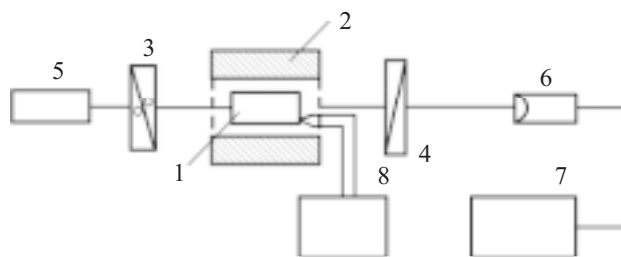


Рис. 8. Схема устройства для градуировки термочувствительного элемента на основе лейкосапфира:

1 — пластина монокристалла лейкосапфира; 2 — нагревательное устройство; 3, 4 — поляризаторы; 5 — источник монохроматического излучения; 6 — фотоприемник; 7 — регистрирующее устройство; 8 — термопара с блоком регистрации напряжения

ставляло  $45^\circ$  со взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации поляризатора 3 и анализатора 4. Пластина освещалась гелий-неоновым лазером 5 с длиной волны 632,8 нм, которое после прохождения системы попадало на приемник 6, сопряженный с регистрирующим устройством 7. Температура определялась с помощью термопары 8, контактирующей с кристаллом. Фрагмент зарегистрированных изменений интенсивности света с температурой для пластины кристалла лейкосапфира показан на рис. 9, а.

Построенная на основе проведенных измерений градуировочная кривая представлена на рис. 9, б. Она представляет собой зависимость условной разницы хода, возникающей при нагревании кристалла, от температуры. При этом по оси ординат отложены порядковые номера  $m$  максимумов зависимости сигнала на выходе термометра от температуры. Как вид-

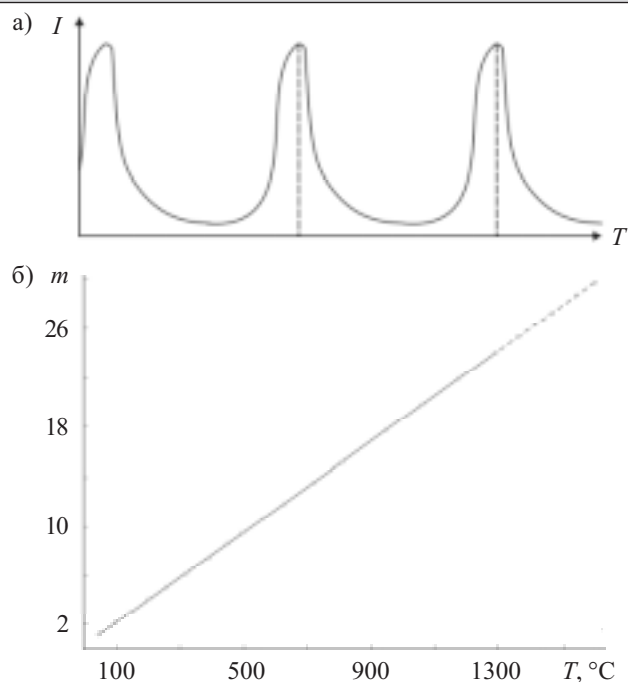


Рис. 9. Изменение интенсивности света с температурой (а) и градуировочная кривая (б) для кристалла лейкосапфира

но из рисунка, значение  $m$  изменяется линейно и позволяет проводить измерения температуры в диапазоне до  $1200^\circ\text{C}$ . При измерениях использовались датчики на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной  $3,2$  мм, при этом характерный период температуры  $\hat{T}$  составлял  $12^\circ\text{C}$ . Чувствительность в данных исследованиях достигала величины  $200 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ , а точность регистрации изменения температуры —  $0,001^\circ\text{C}$ . Не исключено, что такая линейная зависимость для лейкосапфира сохраняется и при более высоких температурах, однако подтвердить данное предположение экспериментально не удалось из-за приборных ограничений.

Как уже отмечалось, *ниобат лития* является перспективным материалом для датчиков устройств измерения температуры, основанных на регистрации температурных изменений двулучепреломления кристаллов [8].

Достаточно детальный обзор оптических свойств кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  (дисперсии показателей преломления, их температурных зависимостей) приведен в [16]. Однако широкое использование кристаллов ниобата лития в оптоэлектронике продолжает привлекать ученых к исследованиям свойств этого материала, и на сегодняшний день насчитывается несколько тысяч публикаций, так или иначе касающихся их оптических свойств. Проанализировать такое количество публикаций достаточно сложно, но можно сделать вывод о том, что  $\text{LiNbO}_3$  имеет определенные особенности, которые необходимо учитывать при конструировании термометров.

Во-первых, диапазон измерений ограничен тем, что кристалл претерпевает сегнетоэлектрический фазовый переход при температуре порядка  $1210^\circ\text{C}$ .

Во-вторых, кристаллы ниобата лития, выращенные по методу Чохральского, имеют конгруэнтный состав, когда отношение содержания кристаллообразующих

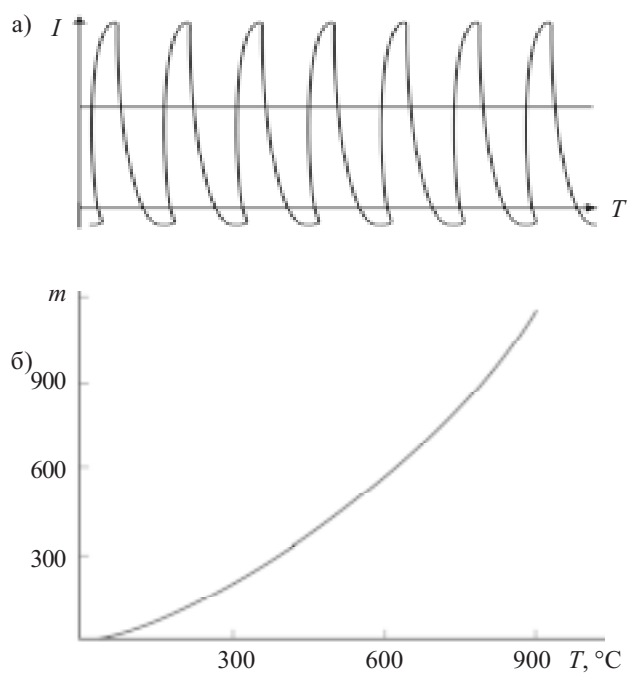


Рис. 10. Изменение интенсивности света с температурой (а) и градуировочная кривая (б) для кристалла ниобата лития

окислов  $R=\text{Li}_2\text{O}/\text{Nb}_2\text{O}_5$  существенно меньше единицы [16, с. 133—134], причем соотношение компонент может изменяться в пределах от  $0,94$  до величин, близких к  $1$ , даже в границах одного кристалла. Такое свойство ниобата лития требует тщательного контроля оптической однородности активных элементов, а также специальной градуировки каждого элемента, поскольку значения показателей преломления кристаллов (а соответственно и двулучепреломления) зависят от величины  $R$ .

В-третьих, нагревание кристаллов ниобата лития в восстановительной атмосфере или вакууме до температуры выше  $450^\circ\text{C}$  приводит к практически полной потере их прозрачности [17], т. е. проводить измерения температуры объектов можно только в воздушной или окислительной атмосфере.

В наших экспериментах использовались кристаллы, полученные в НПП «Карат» (г. Львов) по технологии, описанной в [10], которые имели состав  $R=0,96$ . Контроль оптической однородности кристаллов и отбор элементов проводился по коноскопической методике, описанной там же.

Для градуировки активных элементов из ниобата лития применялось то же устройство, что и для лейкосапфира. Зависимость интенсивности света от температуры (для пластины кристалла ниобата лития приведена на рис. 10, а). Построенная на основе проведенных измерений градуировочная кривая показана на рис. 10, б. Как видно из рисунков, период температуры для активного элемента из ниобата лития несколько меньше, чем для кристалла сапфира, однако градуировочная кривая в широком температурном диапазоне имеет нелинейный характер. В то же время, использование кристаллов ниобата лития, по сравнению с кристаллами сапфира, позволяет повысить точность измерения температуры вследствие больших

значений двулучепреломления и меньших величин периода температуры.

### Выводы

Таким образом, проведенные исследования позволили обосновать и практически реализовать поляризационно-оптический метод измерения температуры, основывающийся на явлении температурного изменения величины двулучепреломления оптически анизотропных кристаллов. Практическая реализация метода при использовании пластин лейкосапфира и ниобата лития в качестве активных элементов термометров показала, что применение лейкосапфира более предпочтительно благодаря широкому температурному интервалу использования материала, его механической и химической стойкости, отсутствию фазовых переходов. Ниобат лития обладает такими недостатками как нелинейность градуировочной зависимости и наличие точки фазового перехода, однако, несмотря на это, его использование позволяет повысить чувствительность термометра и увеличить точность измерений.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства.— К.: Наук. думка, 1979.
2. Санников Г. В. Датчики для измерения температуры в промышленности.— К.: Наук. думка, 1973.
3. А. с. 821960 СССР. Устройство для измерения температуры / Н. А. Романюк, А. М. Костецкий, В. М. Габа.— 1981.— Бюл. № 14.
4. А. с. 1374962 СССР. Устройство для регулирования температуры / В. М. Габа, З. М. Урсул, Н. А. Романюк.— 1987.— Бюл. № 12.
5. В. М. Габа, З. М. Урсул, Н. А. Романюк и др. Применение сегнетоэлектрических кристаллов в качестве термодатчиков для поляризационно-оптического способа измерения температуры // В кн.: Актуальные проблемы получения сегнето- и пьезоэлектрических материалов и их роль в ускорении научно-технического прогресса.— М.: Изд-во НИФХИ им. Л. Я. Карпова, 1987.— С. 134.
6. А. с. 1461143 СССР. Оптическое устройство для измерения температуры / Н. А. Романюк, А. Е. Носенко, В. М. Габа, С. П. Новосадный.— 1988.— Бюл. № 10.
7. А. с. 1500864 СССР. Поляризационно-оптический цифровой термометр / В. М. Габа, М. В. Степаняк, П. Г. Столярчук.— 1989.— Бюл. № 30.
8. Gaba V. M., Sugak D. Yu., Kravchuk I. M. On the possible application of LiNbO<sub>3</sub> single crystals as temperature indicators on the base of their temperature dependencies of birefringence // Proc. SPIE.— 1997.— Vol. 2795.— P. 321—324.
9. Классен-Неклюдова М. В., Багдасаров Х. С. Рубин и сапфир.— М.: Наука, 1974.
10. Сольский И. М., Сугак Д. Ю., Габа В. М. Получение оптически однородных монокристаллов ниобата лития больших размеров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 5.— С. 51—55.
11. Багдасаров Х. С., Гречушников Б. А., Качалов О. В. и др. Оптические свойства синтетического лейкосапфира // Кристаллография.— 1985.— Т. 30, вып. 3.— С. 605—607.
12. Malitson T. H., Murfhy F. V., Rodney W. S. Refractive index of synthetic sapphire // J. Opt. Soc. Amer.— 1958.— Vol. 48.— P. 72—75.
13. Malitson T. H. Refraction and dispersion of synthetic sapphire // J. Opt. Soc. Amer.— 1962.— Vol. 52.— P. 1377—1380.
14. Grushak D. A., Burch D. A. Optical and infrared properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at elevated temperatures // J. Opt. Soc. Amer.— 1965.— Vol. 55.— P. 625—627.
15. Букатый В. И., Гончаров Ю. В., Краснопевцев В. Н. и др. Исследование температурной зависимости показателя преломления сапфира // Оптика и спектроскопия.— 1984.— Т. 56, вып. 3.— С. 461—463.
16. Кузьминов Ю. С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития.— М.: Наука, 1987.
17. Sugak D., Zhydashchinskii Ya., Sugak Yu. et al. In situ investigation of optical absorption changes in LiNbO<sub>3</sub> during reducing/oxidizing high-temperature treatments // J. Phys.: Condens. Matter.— 2007.— Vol. 19.— P. 086211.

### НОВЫЕ КНИГИ

**Архипов А. М., Иванов В. С., Панфилов Д. И. Датчики Freescale Semiconductor.— М.: Додэка, 2008.— 184 с.**

Книга содержит основную информацию о датчиках Freescale Semiconductor — бывшего подразделения фирмы Motorola.

Представлены краткие теоретические сведения, отражающие общие принципы построения систем и тенденции развития приборов, которые помогут читателю лучше ориентироваться в информационных материалах. Таблицы с основными характеристиками приборов дают возможность предварительно выбрать необходимый тип датчика. Приводится методика поиска подробной информации на веб-сайте компании или на прилагаемом к книге компакт-диске.

В первой главе книги подробно рассматриваются датчики ускорения и новые приборы на их основе. Во второй и третьей главах детально излагаются изменения, происшедшие в секторе датчиков давления, особенно датчиков давления в автомобильных шинах (система TPMS).

Датчики приближения, рассмотренные в четвертой главе, представляют собой новый вид бизнеса с широким спектром практического использования: мобильные телефоны, карманные компьютеры, MP3-плееры и т. д.

На прилагаемом CD-диске представлена полная техническая информация обо всех датчиках компании Freescale Semiconductor (Data Sheets) и статьи по их применению (Application Notes).

Для специалистов в области электроники, студентов технических вузов и широкого круга читателей, интересующихся устройствами обработки сигналов от датчиков физических величин.

