



# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Магунов, д.ф.-м.н., Б. Лапшинов, к.т.н.,  
НИИ перспективных материалов и технологий;  
lbaniipmt@mail.ru

Приведены экспериментальные результаты определения температурной зависимости показателя преломления  $n(T)$  ряда широкозонных полупроводниковых материалов. Эти значения являются определяющим условием при внедрении и использовании лазерной интерференционной термометрии в технологических процессах и научных исследованиях.

**М**етод лазерной термометрии твердых тел имеет множество преимуществ, связанных с технологией микроэлектроники, - процессами плазмохимического осаждения и травления [1-3], ионной имплантацией полупроводников [4], быстрыми термическими процессами, в которых подложка в реакторе нагревается мощным оптическим излучением до температур вблизи 1000-1200К, а также с молекулярно-лучевой эпитаксией [5].

Лишь узкий круг специалистов знаком с большими потенциальными возможностями этого метода. Однако они не спешат переносить его на решение исследовательских и технологических задач в другие промышленные области, сдерживая широкое применение лазерной термометрии [6].

Метод лазерной интерференционной термометрии (ЛИТ), применяемый во многих работах, обеспечивает наибольшую температурную чувствительность используемого сигнала. Для широкого класса материалов электроники и оптоэлектроники должны быть известны значения физических констант, характеризующие их оптические свойства. Научный и технологи-

# EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF REFRACTIVE INDEX IN SEMICONDUCTOR MATERIALS

A. Magunov, Dr. of Science (Phys. and Math.),  
B. Lapshinov, Ph.D. (Engineering), lbaniipmt@mail.ru,  
Research Institute of Advanced Materials and Technologies;  
www.niipmt.ru, Moscow

The experimental results of determination of temperature dependence of refractive index  $n(T)$  of a number of wide-band semiconductor materials are given. These results are prerequisite for the implementation and use of laser interference thermometry in industrial processes and researches.

**M**ethod of laser thermometry of solid bodies has a number of advantages connected with the technology of microelectronics - processes of plasma-chemical deposition and etching [1-3], ion implantation of semiconductors [4], fast thermal processes, in which the substrate in reactor is heated by high-power optical radiation up to the temperatures near 1000-1200 K, and molecular beam epitaxy [5].

Only small group of specialists is familiar with the great potential capabilities of this method. However, they are not in a hurry to transit it on the solution of research and technological tasks into other industrial areas restraining the broad application of laser thermometry [6].

Method of laser interference thermometry (LIT) used in many operations provides the greatest temperature sensitivity of used signal. The values of physical constants, which characterize their optical properties, must be known for wide range of materials of electronics and optoelectronics. Scientific and technological interest in wide-band gap materials requires the obtainment of temperature dependences of refractive indices of materials at different wavelengths for every new material. LIT allows measuring the transient temperature of plane-parallel plate, and it is the most sensitive method of thermometry of semiconductor and dielectric substrates in microtechnology. This method is most frequently used for the studies of

ческий интерес к широкозонным материалам требует, чтобы по каждому из новых материалов были получены температурные зависимости показателей преломления материалов на разных длинах волн. ЛИТ позволяет измерять нестационарную температуру плоскопараллельной пластинки и является самым чувствительным методом термометрии полупроводниковых и диэлектрических подложек в микротехнологии. Этот метод наиболее часто применяется для изучения температурных режимов подложек из кремния, арсенида галлия, плавящего кварца и различных стекол. Схема метода приведена на рис.1.

Метод ЛИТ основан на том, что прозрачная или полупрозрачная плоскопараллельная пластинка является для зондирующего светового пучка эталоном Фабри-Перо. То есть обе поверхности пластины исполняют роль двух плоских зеркал с коэффициентами отражения  $R_0 = (n-1)^2 / (n+1)^2$  ( $n$  – показатель преломления), а оптическая толщина пластины ( $nh$ ) ( $h$  – геометрическая толщина пластины) изменяется в зависимости от температуры. На каждой из поверхностей происходит деление падающей волны на две – отраженную и прошедшую волны. Возникающая между пучками разных порядков (отраженной или прошедшей волн) разность хода ( $2nkh$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения) ведет к возникновению интерференции. Как правило, регистрируется интенсивность отраженного излучения, поскольку контраст интерференции в этом случае выше, чем в прошедшем свете.

Для измерения температуры обычно используют He-Ne лазер низкой мощности (5-10 мВт). Излучение с длиной волны  $\lambda = 633$  нм позволяет измерять температуру широкозонных полупроводниковых кристаллов (GaP, ZnS, ZnTe и др.). Для полупроводниковых кристаллов с шириной запрещенной зоны  $E_g \leq 1,5-1,7$  эВ (Si, Ge, GaAs) применяют излучение на длинах волн 1,15; 1,52 и 3,39 нм.

Если температура исследуемого образца в начальный момент составляет  $T_1$ , а через некоторое время изменяется до значения  $T_2$ , то будет зарегистрировано изменение фазы интерферограммы:

$$\Delta\varphi = 2k [n(T_2)h(T_2) - n(T_1)h(T_1)].$$

Если сдвиг фазы превышает  $2\pi$  (один период интерферограммы), можно ввести обозначение

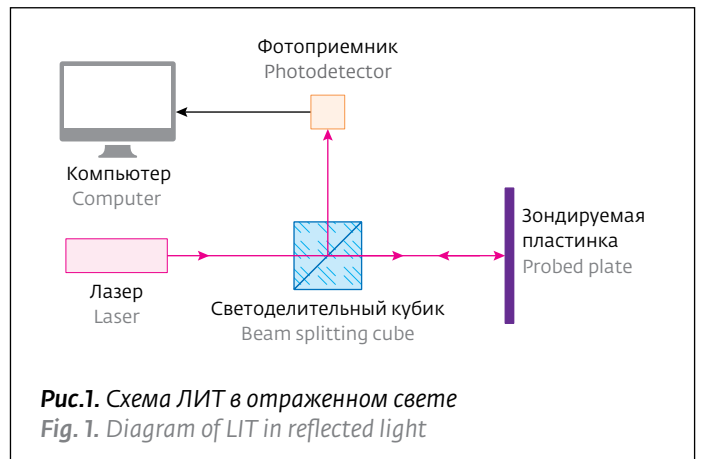


Рис.1. Схема ЛИТ в отраженном свете  
Fig. 1. Diagram of LIT in reflected light

temperature conditions of substrates made of silicon, gallium arsenide, fused quartz and different glasses. The method diagram is given in Fig. 1.

LIT method is based on the fact that transparent or semitransparent plane-parallel plate is Fabry-Perot cavity standard for the probing light beam. In other words, both surfaces of plate play the role of two flat mirrors with the reflection coefficient  $R_0 = (n-1)^2 / (n+1)^2$  ( $n$  – refractive index), and the optical thickness of plate ( $nh$ ) ( $h$  – geometrical thickness of plate) varies depending on temperature. On every surface the splitting of incident wave into two waves – reflected and transmitted – occurs. The difference of travel path occurring between two beams of different orders (reflected or transmitted waves) ( $2nkh$ , where  $k = 2\pi/\lambda$  – wave number,  $\lambda$  – wavelength of probing radiation) results in the occurrence of interference. As a rule, the intensity of reflected radiation is recorded because the contrast of interference in this case is higher than in transmitted light.

In order to measure the temperature, He-Ne laser with low power (5-10 mW) is usually used. Radiation with the wavelength  $\lambda = 633$  nm is used for the measurement of temperature of wide-band semiconductor crystals (GaP, ZnS, ZnTe etc.). For semiconductor crystals with the width of band gap  $E_g \leq 1.5-1.7$  eV (Si, Ge, GaAs) radiation at the wavelengths 1.15, 1.52 and 3.39 nm is used.

If the tested sample at the initial moment has the temperature  $T_1$  and within certain period of time its temperature has changed to the value  $T_2$ , then the variation of interferogram phase will be recorded

$$\Delta\varphi = 2k [n(T_2)h(T_2) - n(T_1)h(T_1)].$$

$\Delta\varphi=2\pi(\Delta N)$ , где  $\Delta N$  – число периодов интерференции. Зная зависимости  $n(T)$  и  $h(T)$ , можно найти явную зависимость температуры от величины  $\Delta N$ .

Существует верхний предел, ограничивающий измерение температуры полупроводниковых монокристаллов. Он обусловлен двумя причинами. Первая из них в том, что существует сдвиг края собственного поглощения в длинноволновую область при нагревании кристалла. Следует учитывать, что влияние сдвига края поглощения не будет проявляться, пока длина волны зондирующего света находится дальше от края поглощения (например, для Si можно с этой целью применять спектральную линию 3,39 мкм вместо 1,15 мкм). Вторая причина кроется в том, что с увеличением концентрации свободных носителей заряда до некоторого уровня полупроводниковый кристалл становится совершенно непрозрачным во всем спектральном диапазоне. Для кремния толщиной 0,5 мм верхний предел, ограничивающий чувствительность метода ЛИТ, расположен вблизи 1000К на длине волны 1,8 мкм (для других используемых длин волн предел ниже этой температуры). Для арсенида галлия верхний предел находится вблизи 1300К. Для широкозонных кристаллических диэлектриков верхний предел измеряемых температур совпадает с температурой плавления. Для стекол верхний предел лежит вблизи температуры стеклования, выше которой начинается размягчение материала, его вязкое течение и деформация пластин.

## РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММЫ

Нами была разработана автоматизированная установка для измерения температурной зависимости показателя преломления  $n(T)$  полупроводниковых и диэлектрических материалов [7]. Схема установки показана на рис.2.

Источником зондирующего света являлся гелий-неоновый лазер ЛГН-118-3В (НИИГРП "Плазма") с генерацией на длинах волн 0,633; 1,15 и 3,39 мкм. В эксперименте образец облучался одной из трех линий. Мощность излучения лазера составляла 5-10 мВт. Оптический тракт состоял из светоделителя, собирающей линзы с фокусным расстоянием 10 см и фотоприемника. Диаметр зондирующего лазерного пучка на лицевой поверхности образца был равен ~0,3 мм, при этом для большинства образцов достигался высокий контраст интерференции. Исследуемые образцы

If the phase shift exceeds  $2\pi$  (one period of interferogram), the expression  $\Delta\varphi=2\pi(\Delta N)$  can be introduced, where  $\Delta N$  – number of interference periods. Knowing the dependences  $n(T)$  and  $h(T)$  the explicit dependence of temperature on the value  $\Delta N$  can be found.

There is upper limit restricting the measurement of temperature of semiconductor monocrystals. It is stipulated by two reasons. One of them consists in the fact that there is shift of the edge of own absorption into long-wavelength region when heating the crystal. It should be taken into account that the influence of shift of absorption edge will not become apparent until the wavelength of probing light is farther from absorption edge (for example, for this purpose the line of 3.39  $\mu\text{m}$  instead of 1.15  $\mu\text{m}$  can be applied for Si). The second reason consists in the fact that with the increase of concentration of free charge carriers to certain level the semiconductor crystal becomes completely non-transparent within the whole spectral range. For silicon with the thickness of 0.5 mm the upper limit restricting the sensitivity of LIT method is located near 1000 K at the wavelength 1.8  $\mu\text{m}$  (for other used wavelengths the limit is lower than this temperature). For gallium arsenide the upper limit is located near 1300 K. For wide-band crystalline dielectrics the upper limit of measured temperatures concurs with the melting point; at the temperature higher than melting point the material softening, its viscous flow and plate deformation take place.

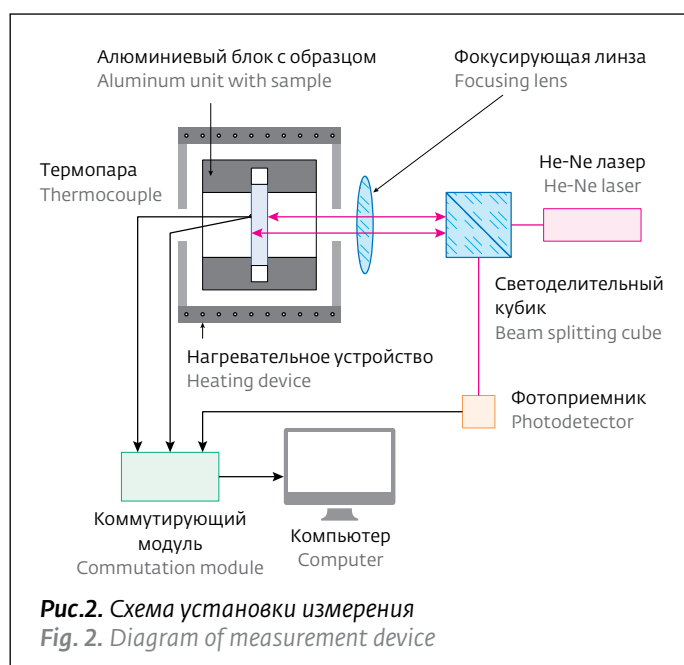


Рис.2. Схема установки измерения  
Fig. 2. Diagram of measurement device



имели форму плоскопараллельных пластинок размером  $\sim 5 \times 5$  мм<sup>2</sup> и толщиной  $h = 0,1-1$  мм.

Образец закреплялся в алюминиевом блоке с помощью теплопроводящего клея. Температура образца измерялась термопарой, подведенной к тыльной стороне образца и приклеенной к его поверхности вблизи участка, зондируемого лазерным пучком. Время нагревания образца от комнатной температуры до  $T \approx 600-700$  К составляло примерно 30 мин, последующее время остывания до  $T \approx 350$  К – около 1,5 часа.

Отраженное от образца излучение с длиной волны  $\lambda = 0,633$  мкм детектировалось кремниевым фотодиодом ФД25К, с  $\lambda = 1,15$  мкм – германиевым фотодиодом ФД-7Г, с  $\lambda = 3,39$  мкм – радиационным термоэлементом РТН-10Г (с германиевым входным окном). Все элементы оптической схемы закреплялись на оптической скамье, предусматривалась возможность юстировки. С помощью двухканального модуля Е-270 термодатчик и фотоприемник соединялись с компьютером.

Для регистрации и обработки данных, полученных в эксперименте, была разработана специальная программа. Одновременно регистрировалась зависимость от времени температуры образца  $T(t)$  и интенсивности отраженного света  $I(t)$  как

## RECORDING AND PROCESSING OF INTERFEROGRAM

We have developed the automated device for the measurement of temperature dependence of refractive index  $n(T)$  of semiconductor and dielectric materials [7]. The device diagram is shown in Fig. 2.

Helium-neon laser LGN-118-3V (NIIGRP "Plazma") with the generation at the wavelengths 0.633; 1.15 and 3.39  $\mu\text{m}$  is the source of probing light. In experiment the sample is irradiated by one of three lines. The laser radiation power is 5-10 mW. The optical path consists of beam splitter, converging lens with the focal distance of 10 cm and photodetector. The diameter of probing laser beam at the front-face surface of sample is equal to  $\sim 0.3$  mm, at the same time for the majority of samples high contrast of interference is reached. Studied samples have the shape of plane-parallel plates with the dimensions  $\sim 5 \times 5$  мм<sup>2</sup> and thickness  $h = 0.1-1$  mm.

The sample was fixed in aluminum unit with the help of heat conducting glue. The sample temperature is measured by thermocouple brought to the sample backside and glued to its surface near the region, which is probed by laser beam. The

при нагревании, так и при остывании образца. Затем время исключалось, и с помощью, полученной интерферограммы  $I(T)$  проводится определение искомой зависимости  $n(T)$ . Сдвиг на одну полосу интерференции соответствовал изменению оптической толщины на половину длины волны:  $D(nh) = l/2$ .

Правильность измерения температуры кристалла проверялась следующим образом. Условие достижения экстремумов интерферограммы выполнялось независимо от того, увеличивается или уменьшается температура образца. Например, для минимумов интенсивности выполнялось условие  $nh = 0,5lm$ , где  $n$  и  $h$  – показатель преломления и толщина кристалла,  $l$  – длина волны,  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Поэтому основная проверка правильности измерений температуры образца заключалась в сравнении интерферограмм  $I(T)$ , полученных при нагревании и остывании. Если совпадали температуры, при которых достигались экстремумы отраженного света, то разность температур между точками измерения и зондирования была пренебрежимо мала. Если же температуры интерференционных экстремумов при нагревании и остывании заметно различались между собой, то температура, измеряемая термопарой, отличалась от действительной температуры образца в области зондирования.

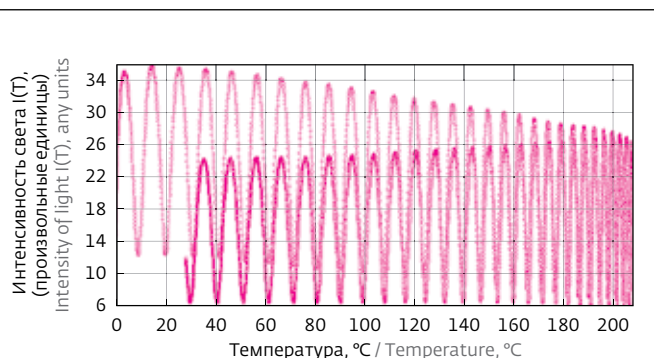
Как показали наши измерения, когда термопара прикреплена к исследуемому образцу на расстоянии  $\sim 1$  мм от места падения светового пучка, наблюдается хорошее совпадение экстремумов интерферограммы на оси температур – расхождение одноименных экстремумов не превышает  $1^\circ\text{C}$  (рис.3).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все измерения начинались при комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ) и выполнялись до  $400\text{--}450^\circ\text{C}$ . Начальные данные по  $n(T)$  и коэффициентам температурного расширения материалов брались из справочников и статей. Зависимость толщины кристалла от температуры  $h(T)$  вычислялась из выражения  $h(T) = h(T_1)[1 + \alpha(T - T_1)]$ .

Температурная зависимость  $n(T)$  монокристалла кремния была определена в работе [8].

**Монокристалл ZnO.** Цинкит (ZnO) относится к числу перспективных материалов для самых прогрессивных технических устройств различного назначения, функционирующих как на основе трехмерных элементов, так и тонких пленок. Сочетание анизотропной кристаллической структуры с широкой запрещенной зоной,

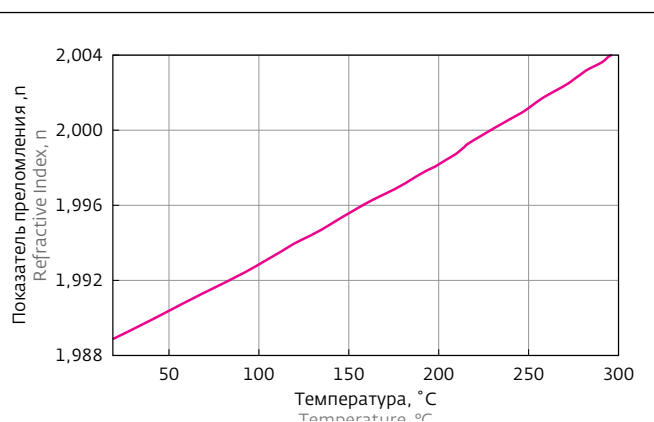


**Рис. 3.** Температурная зависимость интенсивности света  $I(T)$  при нагревании (верхняя интерферограмма) и остывании (нижняя интерферограмма) монокристалла ZnO  
**Fig. 3.** Temperature dependence of light intensity  $I(T)$  in case of heating (top interferogram) and cooling (bottom interferogram) of ZnO monocrystal

time of sample heating from room temperature to  $T \approx 600\text{--}700$  K is approximately 30 min., the further time of cooling to  $T \approx 350$  K is about 1.5 hours.

Radiation reflected from the sample with the wavelength  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$  is detected by silicon photodiode FD25K, with  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  – by germanium photodiode FD-7C, with  $\lambda = 3.39 \mu\text{m}$  – by radiation thermoelement RTN-10G (with germanium aperture). All elements of optical circuit are secured on optical bench, and the capability of adjustment is provided. The connection of temperature-sensitive element and photodetector to computer is performed using two-channel module E-270.

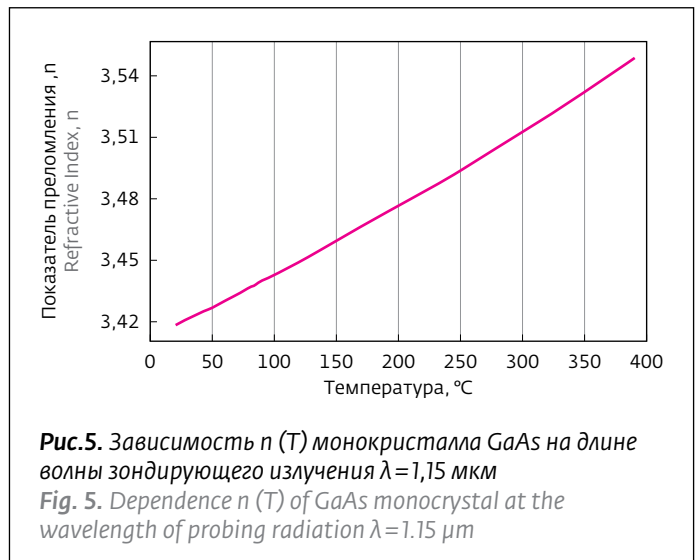
The special program is developed for recording and processing of the data obtained during experiment. Simultaneously, the dependences of sample



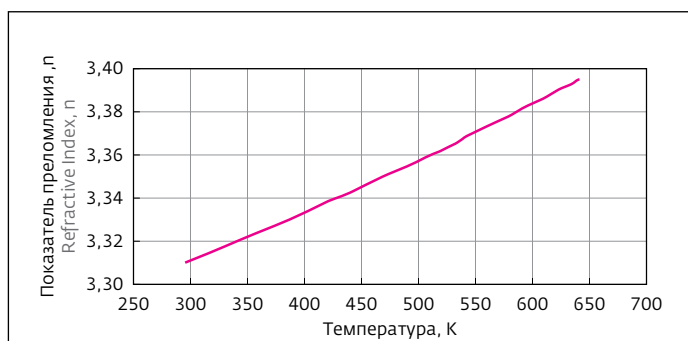
**Рис.4.** Температурная зависимость показателя преломления монокристалла ZnO [7]  
**Fig. 4.** Temperature dependence of refractive index of ZnO monocrystal [7]

люминесцентные свойства, фоточувствительность, радиационная стойкость, фотопроводимость ZnO поистине уникальны. Монокристаллы цинкита могут использоваться в аппаратуре для контроля степени напряженности механических конструкций, при измерениях переменных и квазистатических давлений, в дефектоскопии в широком диапазоне температур, в производстве световодов, газовых сенсоров и УФ-лазеров. Ширина запрещенной зоны ZnO (при  $T=300\text{K}$ ) равна 3,33 эВ. Температурная зависимость показателя преломления ZnO  $n(T)$  была измерена и опубликована [7]. При расчетах были использованы следующие данные: температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_t = 2,92 \cdot 10^{-6} (\text{K}^{-1})$ ; показатель преломления для длины волны 0,5 мкм для обыкновенного луча  $n_o = 1,989$ . Толщина исследуемого кристалла составляла  $h = 578$  мкм. Температурная зависимость  $n(T)$  приведена на рис.4 [7].

**Арсенид галлия GaAs.** Нелегированный полупроводник GaAs с высоким удельным сопротивлением ( $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) используется при изготовлении высокочастотных интегральных схем и дискретных микроэлектронных приборов. Сильнолегированный кремнием GaAs n-типа проводимости применяется при изготовлении



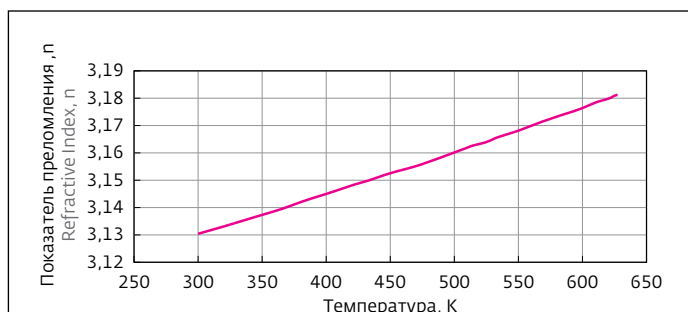
temperature  $T(t)$  and intensity of reflected light  $I(t)$  on time are recorded upon heating and cooling of the sample. Then, the time is excluded, and using obtained interferogram  $I(T)$  the determination of sought for dependence  $n(T)$  is performed. The shift by one interference band corresponds to the variation of optical thickness by wavelength half:  $D(nh) = \lambda/2$ .



**Рис.6.** Зависимость  $n(T)$  монокристалла GaP на длине волны зондирующего излучения  $\lambda = 0,633 \mu\text{м}$   
**Fig. 6.** Dependence  $n(T)$  of GaP monocrystal at the wavelength of probing radiation  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$

светодиодов и лазеров. Монокристаллы сильнолегированного кремнием ( $10^{17}-10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) GaAs широко используются в оптоэлектронике для изготовления инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов, фотокатодов и являются прекрасным материалом для генераторов СВЧ-колебаний. Применяются они и для изготовления туннельных диодов, способных работать при более высоких температурах, чем кремниевые, и на более высоких частотах, чем германиевые. Монокристаллы полуизолирующего арсенида галлия, легированные хромом, используются в инфракрасной оптике.

GaAs в настоящее время рассматривается и в качестве наиболее вероятного материала для фотоэлектрических систем преобразования солнечной энергии. ФЭП (фотоэлектрические преобразователи) на основе GaAs имеют более высокий, чем кремниевые ФЭП, теоретический КПД, так как ширина запрещенной зоны у них практически совпадает с оптимальной шириной запрещенной зоны для



**Рис.7.** Зависимость  $n(T)$  монокристалла GaP на длине волны зондирующего излучения  $\lambda = 1,15 \mu\text{м}$   
**Fig. 7.** Dependence  $n(T)$  of GaP monocrystal at the wavelength of probing radiation  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$

Correctness of crystal temperature measurement was checked in the following manner. Condition for interferogram extremums obtainment is fulfilled notwithstanding whether the sample temperature increases or decreases. For example, for intensity minimums the condition  $nh = 0.5 \text{ lm}$  is fulfilled, where  $n$  and  $h$  - refractive index and crystal thickness,  $l$  - wavelength,  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Therefore, the main check of sample temperature measurement correctness consists in the comparison of interferograms  $I(T)$  obtained during the heating and cooling. If the temperatures, at which extremums of reflected light are obtained, concur, then the temperature difference between the points of measurement and probing is negligible. If the temperatures of interference extremums upon heating and cooling significantly differ, then the temperature measured by thermocouple differs from the actual sample temperature in the area of probing.

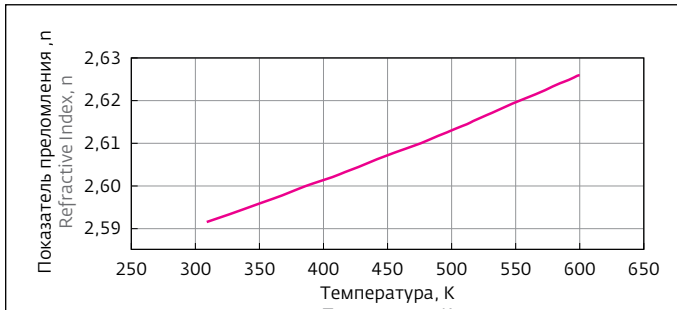
As our measurements have proved, when thermocouple is connected to studied sample at the distance "1 mm from the place of light beam incidence, good concurrency of interferogram extremums on the axis of temperatures is observed - the discrepancy of same-name extremums does not exceed  $1^\circ\text{C}$  (Fig. 3).

## RESULTS OF EXPERIMENTS

All measurements were started at the room temperature ( $20^\circ\text{C}$ ) and performed up to  $400-450^\circ\text{C}$ . Initial data by  $n(T)$  and coefficients of thermal expansion of materials was taken from reference books and articles. The dependence  $h(T)$  was calculated on the basis of the expression  $h(T) = h(T_1) [1 + \alpha(T - T_1)]$  where the known parameters were inserted.

Temperature dependence  $n(T)$  of silicon monocrystal was determined in the paper [8].

**Monocrystal ZnO.** Zincite (ZnO) refers to the number of advanced materials for the most progressive technical devices with various intended purposes, which function on the basis of three-dimensional elements and thin films. Combination of anisotropic crystalline structure with wide band gap, luminescent properties, photo-sensibility, radiation resistance, photoconductivity of ZnO are truly unique. Zincite monocrystals can be used in the equipment intended for the control of stress degree of mechanical structures, during the measurements of alternating and quasi-static pressure, in defectoscopy within wide range of temperatures, in production of light guides, gas sensors and UV

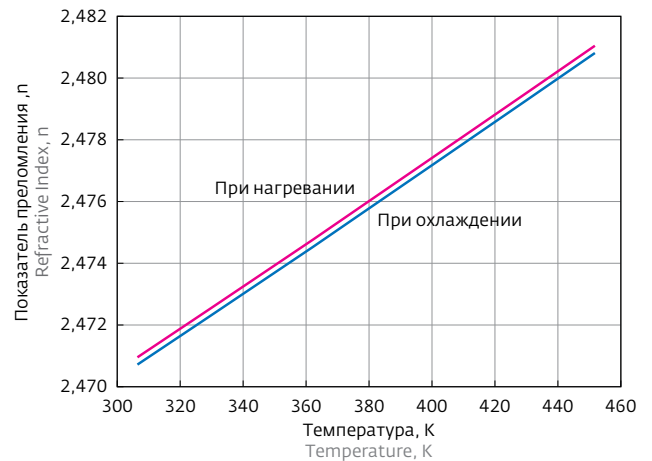


**Рис.8.** Зависимость  $n(T)$  монокристалла ZnSe на длине волны зондирующего излучения  $\lambda=0,633$  мкм (по минимумам при нагревании)

**Fig. 8.** Dependence  $n(T)$  of ZnSe monocrystal at the wavelength of probing radiation  $\lambda=0.633$   $\mu\text{m}$  (by minimums for heating)

полупроводниковых преобразователей солнечной энергии (1,4 эВ). У кремниевого ФЭП этот показатель равен 1,1 эВ.

Кроме этого, арсенид галлия используется для изготовления линз и светоделителей и является альтернативой ZnSe в оптических системах непрерывных CO<sub>2</sub>-лазеров средней и высокой мощности.



**Рис.9.** Зависимость  $n(T)$  монокристалла ZnSe на длине волны зондирующего излучения  $\lambda=1,15$  мкм (по минимумам при нагревании и при охлаждении)

**Fig. 9.** Dependence  $n(T)$  of ZnSe monocrystal at the wavelength of probing radiation  $\lambda=1.15$   $\mu\text{m}$  (by minimums for heating and cooling)

lasers. Width of ZnO band gap (at  $T=300\text{K}$ ) is equal to 3.33 eV. Temperature dependence of ZnO refractive index  $n(T)$  was measured and published [7]. The following data was used in calculations: ther-



Зависимость  $n(T)$  GaAs исследовалась на монокристалле ориентации (100) толщиной  $h=485$  нм на длине волны  $\lambda=1,15$  мкм. Для расчетов использовалось значение показателя преломления  $n=3,44$  (для  $T=300$ К); температурный коэффициент линейного расширения был  $\alpha_t=5,82 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [9].

По результатам нескольких измерений для интервала температур 20–400°C было получено:  $n(T)=3,385335+1,26897 \cdot 10^{-4}T+1,78814 \cdot 10^{-7}T^2$ . График  $n(T)$  для GaAs представлен на рис.5.

**Фосфид галлия GaP.** Разработка электронных компонентов на основе фосфида галлия является частью обширной и разветвленной программы создания элементной базы высокотемпературной электроники, или электроники, ориентированной на высокотемпературные применения. Актуальность создания подобной элементной базы обязана дальнейшему развитию таких приоритетных направлений современной техники, как аэрокосмические технологии и вопросы безопасности ядерных реакторов, глубинное бурение и гелиоэнергетика, создание робототехнических устройств для работы в экстремальных условиях.

Монокристаллический фосфид галлия – основной материал для получения светодиодов красного, красно-оранжевого, оранжевого и желтого свечения, применяемых в больших цветных экранах, в аппаратуре, обслуживающей движение транспорта, и в архитектурном освещении. Используется также при изготовлении оптических линз и линз для лазеров.

Измерение  $n(T)$  фосфида галлия проводилось на двух длинах волн – 0,633 мкм и 1,15 мкм. Толщина исследуемого монокристалла  $h=313$  мкм. Исходные данные для расчетов: показатели преломления:  $n=3,31$  ( $\lambda=0,633$  мкм) и  $n=3,13$  ( $\lambda=1,15$  мкм); коэффициент температурного расширения  $\alpha_t=5,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

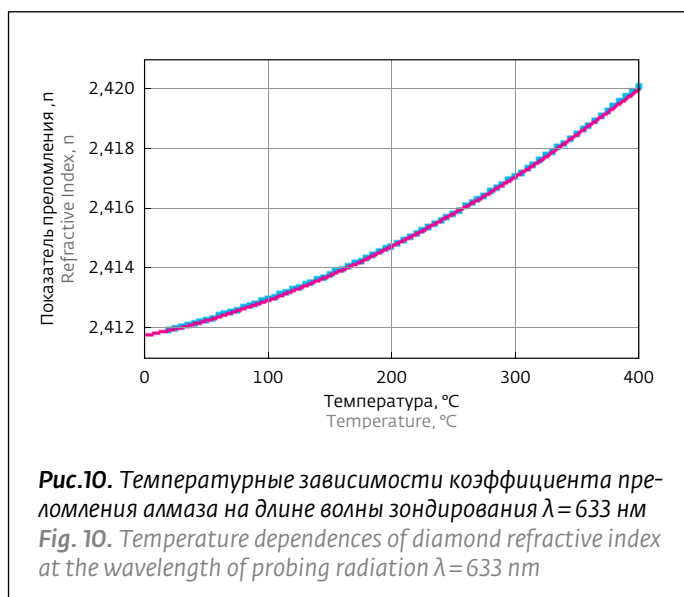
В результате данного исследования были получены экспериментальные зависимости фото ЭДС от температуры и рассчитаны температурные зависимости показателя преломления монокристалла GaP для двух длин волн:

$$n(T)=1,40364 \cdot 10^{-4}T+1,12906 \cdot 10^{-7}T^2+3,25898$$

для  $\lambda=0,633$  мкм;

$$n(T)=1,15634 \cdot 10^{-4}T+4,14194 \cdot 10^{-8}T^2+3,09187$$

для  $\lambda=1,15$  мкм.



**Рис.10.** Температурные зависимости коэффициента преломления алмаза на длине волны зондирования  $\lambda=633$  нм  
**Fig. 10.** Temperature dependences of diamond refractive index at the wavelength of probing radiation  $\lambda=633$  nm

mal coefficient of linear expansion  $\alpha_t=2.92 \cdot 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$ ; refractive index for the wavelength of  $0.5 \mu\text{m}$  with regard to ordinary beam  $n_o=1.989$ . Thickness of studied crystal was  $h=578 \mu\text{m}$ . Temperature dependence  $n(T)$  is given in Fig. 4 [7].

**Gallium arsenide GaAs.** Undoped semi-insulating GaAs with high specific resistance ( $10^7 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ ) is used for the production of high-frequency integrated circuits and discrete microelectronic devices. GaAs heavily doped by silicon with the conductivity of n-type is used for the production of light emitting diodes and lasers. Monocrystals of GaAs heavily doped by silicon ( $10^{17}\text{--}10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) are widely used in optoelectronics for the production of injection lasers, light emitting diodes and photodiodes, photocathodes, and they represent good material for the generators of SHF oscillations. They are applied for the production of tunnel diodes, which are capable to operate at higher temperatures in comparison with silicon diodes, and at higher frequencies in comparison with germanium diodes. Monocrystals of semi-insulating gallium arsenide doped by chromium are used in infrared optics.

Currently, GaAs is considered in the capacity of the most probable materials for photoelectric systems of solar energy conversion.

PET (photoelectric transducers) based on GaAs have higher theoretical efficiency in comparison with silicon PET because the width of band gap in them practically concurs with the optimal width of band gap for solar energy semiconductor converters (1.4 eV). In silicon PET this parameter is equal to 1.1 eV.



Графически эти зависимости показаны на рис.6 и 7, соответственно.

**Селенид цинка ZnSe (CVD).** Селенид цинка используется в качестве материала для производства оптических элементов: окон, линз, зеркал, призм, светоделителей и других, работающих в ИК-диапазоне. Материал, хотя и поликристаллический, но характеризуется однородной структурой, высоким пропусканием в ИК-области и низкими внутренними потерями, связанными с поглощением и рассеянием. Селенид цинка наиболее часто применяется для изготовления компонентов для CO<sub>2</sub>-лазеров (включая высокомошные) и широкополосных спектральных приборов, работающих в диапазоне от 0,6 до 19 микрон. Он также подходит для изготовления изображающей оптики. Селенид цинка обладает необходимым набором физико-химических параметров для создания на его основе светодиодов синего-голубого излучения.

Измерение  $n(T)$  проводилось, как и при GP, на двух длинах волн – 0,633 мкм и 1,15 мкм. Толщина исследуемого монокристалла  $h=2,13$  мм. Показатель преломления при  $T=293K$ : для  $\lambda=0,633$  мкм  $n=2,59$ ; для  $\lambda=1,15$  мкм,  $n=2,47$  [10].

In addition, gallium arsenide is used for the production of lenses and beam splitters, and it is the alternative to ZnSe in optical systems of continuous CO<sub>2</sub> lasers with medium and high power.

Dependence  $n(T)$  of GaAs was studied using the single crystal with orientation (100), thickness  $h=485$  nm at the wavelength  $\lambda=1.15$   $\mu\text{m}$ . The value of refractive index  $n=3.44$  (at  $T=300K$ ) was used for calculations; thermal coefficient of linear expansion was  $\alpha_t=5.82\cdot 10^{-6}$   $K^{-1}$  [9].

On the basis of results of several measurements for the interval (20–400°C) the following data was obtained:  $n(T)=3.385335+1.26897\cdot 10^{-4}T+1.78814\cdot 10^{-7}T^2$ . The graph  $n(T)$  for GaAs is shown in Fig. 5.

**Gallium phosphide GaP.** Development of electronic components on the basis of gallium phosphide is the part of extensive and branch program of creation of element base of high-temperature electronics or electronics aimed at high-temperature applications. Relevance of generation of such element base is stipulated by the further development of such high-priority areas of current technology as aerospace technologies and matters connected with nuclear reactor safety, deep-hole drilling and solar power engineering, design



Температурный коэффициент расширения  $\alpha_t = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [9].

Из-за большой толщины кристалла и малой теплопроводности (13 Вт/(м·К)), несмотря на низкую скорость нагрева, минимумы при нагревании и при остывании частично не совпадали. Поэтому расчет проводился по минимумам при нагревании и по минимумам при остывании. Результат можно сравнить и оценить погрешность.

Проведенные эксперименты позволили получить зависимости  $n(T)$  (по минимумам при нагревании):

$$n(T) = 2,56403 + 7,384033 \cdot 10^{-5} T + 4,8053767 \cdot 10^{-8} T^2 \\ \text{для } \lambda = 0,633;$$

$$n(T) = 2,45322 + 4,78421 \cdot 10^{-5} T + 2,95636 \cdot 10^{-8} T^2 \\ \text{для } \lambda = 1,15.$$

Результаты измерений в графической форме представлены на рис. 8 и 9.

**Алмаз С.** Исключительная твердость алмаза находит применение в промышленности: его используют для изготовления ножей, сверл, резцов и других подобных изделий. Алмазный порошок (как отход при обработке природного алмаза, так и полученный искусственно) используется как абразив для изготовления режущих и точильных дисков, кругов и т.д. Особенно перспективно развитие микроэлектроники на алмазных подложках. Уже есть готовые изделия, обладающие высокой термо- и радиационной стойкостью. Также перспективно использование алмаза как активного элемента микроэлектроники, особенно в сильноточной и высоковольтной электронике из-за большой величины пробивного напряжения и высокой теплопроводности.

of robot devices for operation under extreme conditions.

Single-crystal gallium phosphide is the basic material for creation of light emitting diodes with red, red-orange, orange and yellow luminescence applied in large color screens, traffic maintenance equipment and architectural lighting; it is used for the production of optical lenses and laser lenses.

Measurement of gallium phosphide  $n(T)$  was performed at two wavelengths – 0.633  $\mu\text{m}$  and 1.15  $\mu\text{m}$ . Width of studied single crystal was  $h = 313 \mu\text{m}$ . Initial data for calculations: refractive indices:  $n = 3.31$  ( $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ ) and  $n = 3.13$  ( $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ ); coefficient of thermal expansion  $\alpha_t = 5.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

As a result of these studies, the experimental dependences of photo-electromotive force on temperature were obtained and temperature dependences of refractive index of GaP monocrystal were calculated for two wavelengths:

$$n(T) = 1,40364 \cdot 10^{-4} T + 1,12906 \cdot 10^{-7} T^2 + 3,25898 \\ \text{for } \lambda = 0,633 \text{ мкм};$$

$$n(T) = 1,15634 \cdot 10^{-4} T + 4,14194 \cdot 10^{-8} T^2 + 3,09187 \\ \text{for } \lambda = 1,15 \text{ мкм}.$$

These dependences are shown graphically in Fig. 6 and 7 respectively.

**Zinc selenide ZnSe (CVD).** Zinc selenide is used in the capacity of material for the production of optical elements: windows, lenses, mirrors, prisms, beam splitters etc. operating within IR range. Though this material is polycrystalline, it is characterized by homogeneous structure, high transmission in IR region and low internal losses connected with absorption and scattering. Zinc selenide is most often used for the production of components for CO<sub>2</sub>-lasers (including high-power



Измерение  $n(T)$  проводились на монокристалле природного алмаза толщиной  $h=366$  мкм на длине волны  $\lambda=0,633$  мкм. Показатель преломления алмаза для этой длины волны при комнатной температуре принимался  $n=2,412$  [11]; коэффициент термического расширения  $\alpha_t=1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . В результате измерений и вычислений получена искомая зависимость  $n(T)$ :  $n(T)=2,4117+(8,82 \pm 0,34) \cdot 10^{-6}T+(2,96 \pm 0,10) \cdot 10^{-8}T^2$ . Графически эта зависимость показана на рис.10.

### ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА ЛИТ

Лазерная интерференционная термометрия применяется в исследованиях, проводимых в сложных экспериментальных условиях: при воздействии на образец пучков заряженных частиц или мощного оптического излучения, в неравновесной плазме и т.д. По производительности, помехозащищенности и точности температурных измерений достигнут уровень, характерный для других оптических методов диагностики. Технологические исследования с помощью ЛИТ чаще всего проводятся в ходе физико-химических процессов обработки металлов, полупроводников и диэлектриков при создании интегральных схем.

В методе ЛИТ температурная чувствительность регистрируемого сигнала в 10–100 раз выше, чем при использовании термодпар. Лазерное излучение имеет несколько характерных признаков (длина волны, поляризация, направление распространения, модуляция интенсивности и т.д.), позволяющих достоверно различать его на фоне интенсивных оптических помех. Такие измерительные характеристики ЛИТ позволяют считать, что метод в будущем станет применяться не только в микротехнологии, но и в других областях.

В настоящее время существует ряд проблем, препятствующих распространению ЛИТ в исследованиях и технологическом контроле. По температурным зависимостям оптических параметров большинства материалов в литературе нет данных в достаточно широком диапазоне длин волн и температур (от криогенной области до точки плавления). Для многих материалов данные получены в узком диапазоне вблизи комнатной температуры. Отсутствует метрологическое обеспечение ЛИТ. Не проводилось экспериментальное сравнение ЛИТ с другими методами. Данные по оптическим свойствам твердых тел, при-

lasers) and wide-band spectral devices operating within the range of 0.6 to 19 microns. It is also suitable for the production of imaging optics. Zinc selenide has the required set of physical and chemical parameters for the creation of light emitting diodes with moderately blue radiation on its basis.

Measurement of  $n(T)$  was performed at two wavelengths – 0.633  $\mu\text{m}$  and 1.15  $\mu\text{m}$ . Thickness of studied monocrystal was  $h=2.13$  mm. Refractive index at  $T=293\text{K}$ : for  $\lambda=0.633$   $\mu\text{m}$   $n=2.59$ ; for  $\lambda=1.15$   $\mu\text{m}$ ,  $n=2.47$  [10]. Thermal coefficient of expansion was  $\alpha_t=7.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [9].

Due to significant thickness of crystal and low heat conductivity (13  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), despite the low speed of heating, minimums for heating and cooling partially did not concur. Therefore, the calculations were carried out on the basis of minimums for heating and minimums for cooling. The result can be compared, and the error can be evaluated.

As a result of a number of experiments, the dependences  $n(T)$  were obtained (by minimums for heating):

$$n(T) = 2,56403 + 7,384033 \cdot 10^{-5}T + 4,8053767 \cdot 10^{-8}T^2 \\ \text{for } \lambda = 0,633;$$

$$n(T) = 2,45322 + 4,78421 \cdot 10^{-5}T + 2,95636 \cdot 10^{-8}T^2 \\ \text{for } \lambda = 1,15.$$

Measurement results are given in graphic form in Fig. 8 and 9.

**Diamond C.** Exclusive hardness of diamond finds its application in industry: it is used for the production of knives, drills, cutters and similar goods. Diamond powder (as waste during the treatment of natural diamond and powder obtained in artificial manner) is used as the abrasive for the production of cutting and grinding blades, rings etc. The development of microelectronics based on diamond substrates is very prospective. There are finished products, which have high thermal and radiation resistance. Also, the use of diamond in the capacity of active element in microelectronics, especially high-current and high-voltage electronics, is prospective due to significant value of breakdown voltage and high heat conductivity.

Measurement of  $n(T)$  was performed using the single crystal of natural diamond with the thickness  $h=366$   $\mu\text{m}$  at the wavelength  $\lambda=0.633$   $\mu\text{m}$ . The refractive index of diamond for this wavelength at



водимые в разных работах, заметно различаются, это требует проведения дополнительных экспериментов и анализа методических погрешностей.

Проведение измерений  $dn/dT$  методом интерферометрии при тщательном контроле температуры образца имеет большое значение для расширения области применения лазерной интерференционной термометрии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Орликовский А.А., Руденко К.В. Диагностика *in situ* плазменных технологических процессов микроэлектроники: современное состояние и ближайшие перспективы. Ч.3. – Микроэлектроника, 2001, т. 30, №5, с.323–344.
2. Волков П., Данильцев В., Лукьянов А., Хрыкин О., Шашкин В. Бесконтактный контроль температуры и толщины в технологии микро- и нанослоев. – Наноиндустрия, 2008, №2, с.20–25.
3. Постников А.В., Косолапов И.Н., Куприянов А.Н., Амиров И.И., Магунов А.Н. Автоматизированный лазерный термометр для исследований плазменных процессов микротехнологии. – ПТЭ, 2008, № 2, с.173–176.
4. Radu I. Layer transfer of semiconductors and complex oxides by helium and/or hydrogen implantation and wafer bonding. – Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2003.
5. Balmer R.S., Martin T. Substrate temperature reference using SiC absorption edge measured by *in situ* spectral reflectometry. – J. Cryst. Growth, 2003, v.248. p.216–221.
6. Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел. – М.: Физматлит, 2001.
7. Лапшинов Б.А., Магунов А.Н. Установка для измерения температурной зависимости показателя преломления твердых тел. – ПТЭ, 2010, №1, с.159–164.
8. Magunov A.N. Temperature dependence of the refractive index of silicon. – Оптика и спектроскопия, 1992, т. 73, №2, с.353.
9. Физические величины. Справочник (А.П.Бабичев, Н.А.Бабушкина и др./Под ред. И.С.Григорьева). – М.: Энергоатомиздат, 1991.
10. Сенник Б.Н. Применение кристаллов в перспективных разработках гиперспектральных оптических систем. – Прикладная физика, 2007, №3, с.136–143.
11. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: a data handbook. – Berlin: Heidelberg: Springer, 2001, p. 6.

room temperature was assumed to be  $n=2.412$  [11]; coefficient of thermal expansion was  $\alpha_t=1\cdot 10^{-6} K^{-1}$ . As a result of measurements and calculations, the sought-for dependence  $n(T)$  was obtained:  $n(T)=2.4117+(8.82\pm 0.34)\cdot 10^{-6} T+(2.96\pm 0.10)\cdot 10^{-8} T^2$ . This dependence is shown graphically in Fig. 10.

## PROSPECTIVES OF LIT METHOD

Laser interference thermometry is used in the studies carried out under difficult experimental conditions: upon exposure of charged particle beams on the sample or high-power optical radiation, in non-equilibrium plasma etc. In productivity, interference immunity and accuracy of temperature measurements, the level, which is typical for other optical methods of diagnostics, has been reached. Technological studies using LIT are often carried out in the course of the physical and chemical processes of treatment of metals, semiconductors and dielectrics during the creation of integrated circuits.

In LIT method the temperature sensitivity of recorded signal is by 10–100 times higher than in case of use of thermocouples. Laser radiation has several characteristic features (wavelength, polarization, direction of propagation, modulation of intensity etc.), which make it possible to differentiate it reliably against the background of intense interference. Such measurement characteristics of LIT allow believing that in future the method will be used not only in microtechnology but in other areas as well.

Currently, there is number of problems, which prohibit the spread of LIT, in studies and technological control. With regard to temperature dependences of optical parameters of the majority of materials, there is no data in the literature in sufficiently wide range of wavelengths and temperatures (from cryogenic region to melting point). For many materials data was obtained within narrow range in proximity of room temperature. There is no metrological support of LIT. The experimental comparison of LIT with other methods was not performed. Data on the optical properties of solid bodies given in different papers noticeably differ, and it requires additional experiments and analysis of methodical errors.

Measurement of  $dn/dT$  using the method of interferometry with the careful control of sample temperature has significant value for the expansion of application range of laser interference thermometry.