

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАНАРНОГО ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ КООРДИНАТНО- ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ВАТТМЕТРАХ

В. В. БЛИЗНЮК, А. Е. ТАРАСОВ, А. А. ТИНАЕВ

Московский энергетический институт (технический университет),
Москва, Россия, e-mail: BlizniukVV@mpei.ru

Рассмотрены метрологические характеристики первичных измерительных преобразователей средней мощности лазерного излучения с планарными преобразовательными элементами. Показана возможность создания на их основе широкоапертурных координатно-чувствительных ваттметров.

Ключевые слова: лазерное излучение, средняя мощность, планарная технология, преобразовательный элемент, лазерный ваттметр.

The metrological characteristics of primary measuring transducer of the average power laser radiation with planar sensitive elements are considered. The possibility of development on they basis of position-sensing laser wattmeter with large aperture are shown.

Key words: laser radiation, average power, planar technology, sensitive element, laser wattmeter.

По мере все более широкого использования лазеров в различных областях науки и техники актуальной становится задача создания multifunctional рабочих средств измерений (РСИ) энергетических и пространственно-энергетических параметров широких пучков лазерного излучения. В тех случаях, когда трансформация пучка диагностируемого лазерного излучения недопустима, эффективное решение этой задачи невозможно без разработки нового поколения высокотехнологичных широкоапертурных первичных измерительных преобразователей (ПИП) прямого лазерного излучения. В последние пят-

надцать лет как в России, так и за рубежом разработано большое количество лазерных ваттметров с диаметром входного окна 25 мм и более [1 – 8]. Однако входящие в них ПИП сконструированы, за редким исключением [1], для обеспечения измерений только средней мощности прямого излучения. Функциональные возможности лазерных ваттметров можно расширить путем использования в них широкоапертурных матричных ПИП. Известные в настоящее время такие преобразователи предназначены для измерений полной энергии импульсного лазерного излучения и ее распределения в поперечном сечении пучка [6, 7]. Они могут быть адаптированы к измерениям средней мощности и координат энергетического центра лазерного пучка (ЭЦЛП) непрерывного излучения и использованы в координатно-чувствительных лазерных ваттметрах. Однако при этом точность измерений средней мощности излучения ограничивается коэффициентом заполнения матрицы и разбросом параметров ее приемных элементов, а точность измерений координат ЭЦЛП – размерами этих элементов. Проведение одновременных прецизионных измерений средней мощности излучения и координат ЭЦЛП предполагает применение ПИП с выделенной плоской приемной площадкой. Именно такую приемную площадку имеет планарный термоэлектрический ПИП в составе РСИ средней мощности лазерного излучения ИМО-4 [9]. Однако сторона квадратной приемной площадки ПИП равна всего лишь 14 мм, а диаметр входного окна ИМО-4 – 12 мм.

Планарная технология изготовления преобразовательного элемента ПИП позволяет формировать приемные площадки с линейными размерами до 200 мм, причем эти размеры ограничены только диаметрами используемых в настоящее время полупроводниковых пластин. Однако существует более жесткое ограничение, накладываемое на максимальные размеры приемной площадки, – предельно допустимое значение тепловых потерь с поверхности преобразовательного элемента вследствие излучения, естественной конвекции и теплопроводности окружающей среды. При увеличении приемной площадки эти потери резко возрастают, что приводит к значительному увеличению неравномерности зонной и нелинейности координатной характеристик и к ухудшению метрологических параметров ПИП.

Ниже рассмотрены условия, при выполнении которых возможно создание на уровне мировых стандартов широкоапертурных планарных термоэлектрических координатно-чувствительных ПИП средней мощ-

ности лазерного излучения (далее – планарных ПИП), а также обсуждены перспективы их использования в координатно-чувствительных ваттметрах. Конкретизация этих условий на начальном этапе конструирования планарного ПИП значительно упрощается, если зависимости его зонной и координатной характеристик от физико-технических параметров можно представить в виде алгебраических функций.

Такая возможность реализуется при моделировании характеристик планарного ПИП, обеспечивающего измерения одной координаты ЭЦП. На рис. 1 схематически изображены основные элементы однокоординатного ПИП и их взаимное расположение. Коллектор энергии длиной B обеспечивает поглощение части падающего на него потока излучения P_0 и преобразование ее в тепловую энергию, а две планарные термоэлектрические батареи (ТЭБ), находящиеся в полном тепловом контакте с термостатом, – преобразование перегревов горячих концов ветвей планарных термопар в электрический сигнал. Приемная поверхность коллектора энергии выполняет функцию приемной площадки ПИП; l_T – длина ветвей термопар; L – длина преобразовательного элемента.

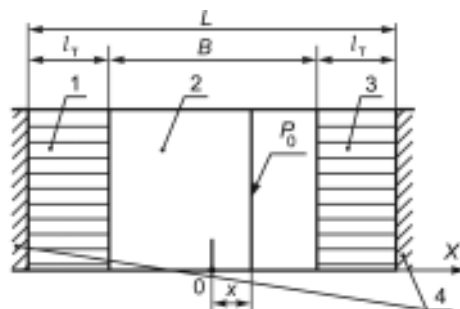


Рис. 1. Схематическое изображение основных элементов планарного ПИП и их взаимного расположения:

1, 3 – термоэлектрические батареи;
2 – коллектор энергии; 4 – термостат

Для оценки возможности использования планарного ПИП в широкоапертурных координатно-чувствительных ваттметрах, найдем предельные метрологические характеристики однокоординатного планарного ПИП.

С этой целью рассмотрим приведенную на рис. 2 упрощенную эквивалентную тепловую схему ПИП. Здесь не показаны распределенные тепловые потери с поверхности ТЭБ в окружающую среду, а термические сопротивления между преобразовательным элементом и термостатом и самого термостата приняты равными нулю.

В той области коллектора энергии, где происходит поглощение части потока излучения P_0 и преобразование в тепловую энергию,

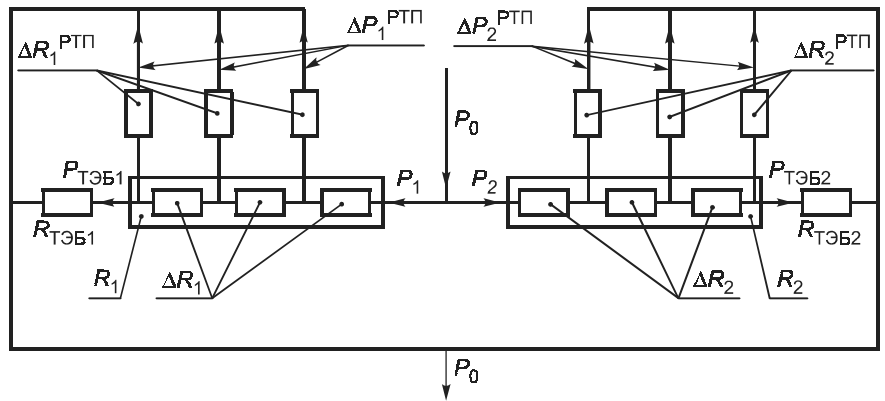


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная тепловая схема однокоординатного планарного ПИП

возникают два тепловых потока P_1 , P_2 , направленных по обе стороны от этой области. Они распространяются в направлениях к элементам R_1 и R_2 эквивалентной тепловой схемы. В случае, когда распределенными потерями с поверхности коллектора энергии можно пренебречь, эти элементы представляют собой термические сопротивления участков коллектора энергии, расположенных слева и справа от области поглощения падающего на коллектор потока лазерного излучения:

$$R_1 = (B/2 + x)/(\alpha S); \quad R_2 = (B/2 - x)/(\alpha S), \quad (1)$$

где B – длина коллектора энергии; x – смещение ЭЦЛП относительно центра коллектора энергии; α – коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен преобразовательный элемент; S – площадь его поперечного сечения.

Каждое из этих сопротивлений представлено на рис. 2 в виде последовательно соединенных термических сопротивлений ΔR_1 , ΔR_2 малых участков коллектора энергии. Распределенные тепловые потери с поверхности коллектора энергии учитывают путем включения в тепловую схему термических сопротивлений $\Delta R_1^{\text{РТП}}$ и $\Delta R_2^{\text{РТП}}$, по которым тепловые потоки с малых участков поверхности коллектора энергии с сопротивлениями ΔR_1 и ΔR_2 стекают в окружающую среду. Распределенные тепловые потери являются паразитными. Они уменьшают тепловые потоки, протекающие по ветвям термопар, и нарушают линейный вид зависимостей R_1 и R_2 от координаты ЭЦЛП.

При протекании тепловых потоков $P_{\text{ТЭБ1}}$ и $P_{\text{ТЭБ2}}$ по термическим сопротивлениям ТЭБ $R_{\text{ТЭБ1}}$ и $R_{\text{ТЭБ2}}$ возникают перегревы концов ветвей термопар, примыкающих к коллектору энергии. Планарная технология изготовления преобразовательных элементов ПИП позволяет практически полностью исключить разброс их параметров и формировать ТЭБ, в которых количество и значения удельных термоЭДС планарных термопар, а также геометрия их ветвей одинаковы. Положим, что на коллектор энергии падает лазерный пучок, поперечное сечение которого имеет форму «лазерного ножа» – отрезка очень узкой полосы длиной, равной ширине коллектора, с постоянной интенсивностью излучения по всей апертуре пучка. В этом случае линии теплового тока направлены вдоль ветвей планарных термопар, и поэтому термическое сопротивление каждой ТЭБ выражается в виде

$$R_{\text{ТЭБ}} = l_t / (\alpha S), \quad (2)$$

а перегревы горячих концов всех ветвей термопар каждой ТЭБ имеют одинаковую величину. Тогда электрический сигнал на выходе i -й ТЭБ

$$E_i = \alpha N P_{\text{ТЭБ}i} R_{\text{ТЭБ}} = \alpha N \theta_i; \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где α – удельная термоЭДС термопары; N – число термопар; $P_{\text{ТЭБ}i}$ – тепловой поток, протекающий по термическому сопротивлению i -й ТЭБ; θ_i – перегрев горячих концов ветвей термопар i -й ТЭБ.

При последовательном включении обеих ТЭБ выходной сигнал ПИП равен сумме их выходных сигналов. Нормированный на падающий поток излучения суммарный сигнал ТЭБ является коэффициентом преобразования ПИП:

$$S^+ = \frac{E_1 + E_2}{P_0} = \frac{\alpha N (P_{\text{ТЭБ1}} + P_{\text{ТЭБ2}}) R_{\text{ТЭБ}}}{P_0} = \frac{\alpha N (\theta_1 + \theta_2)}{P_0}, \quad (4)$$

а зависимость этого коэффициента от координаты ЭЦЛП – его зонной характеристикой.

При встречном включении обеих ТЭБ формируется выходной сигнал ПИП, равный разности сигналов ТЭБ. Зависимость этого сигнала от смещения ЭЦЛП относительно центра коллектора энергии представляет собой координатную характеристику ПИП. Планарный ПИП – амплитудный преобразователь, а координатным характеристикам таких

преобразователей присущ общий недостаток: зависимость от падающего потока излучения. Однако рассматриваемый планарный ПИП способен непрерывно измерять этот поток, что позволяет исключить указанную зависимость координатной характеристики ее нормированием на падающий поток излучения. С учетом (3) нормированную координатную характеристику планарного ПИП можно представить как

$$S^- = \frac{E_1 - E_2}{P_0} = \frac{\alpha N (P_{\text{ТЭБ1}} - P_{\text{ТЭБ2}}) R_{\text{ТЭБ}}}{P_0} = \frac{\alpha N (\theta_1 - \theta_2)}{P_0}. \quad (5)$$

Согласно (3) для расчета выходного сигнала ТЭБ наряду с удельной термоЭДС термопар и их количеством необходимо знать либо тепловой поток, протекающий по ветвям термопар, и термическое сопротивление ТЭБ, либо перегревы горячих концов ветвей термопар.

Рассчитаем перегревы горячих концов ветвей планарных термопар в случае падения на коллектор энергии пучка излучения, имеющего форму «лазерного ножа». При распределенных тепловых потерях с поверхности коллектора энергии значения перегрева находим путем решения уравнения теплообмена для каждой области преобразовательного элемента коллектора с координатой z , отсчитываемой от ЭЦП в направлении термостата. В одномерном приближении это уравнение имеет вид

$$d^2\theta/dz^2 - b^2\theta = 0, \quad (6)$$

где b – параметр распределенных тепловых потерь; θ – перегрев области преобразовательного элемента с координатой z .

Параметр распределенных тепловых потерь

$$b = \sqrt{\alpha_{\Sigma}/(\pi h)}. \quad (7)$$

Здесь α_{Σ} – суммарный коэффициент теплоотдачи, равный сумме коэффициентов теплоотдачи вследствие теплопроводности окружающей среды и естественной конвекции и за счет излучения; h – толщина преобразовательного элемента.

Уравнение (6) решаем с граничными условиями

$$\theta|_{z=L/2+x} = \theta|_{z=L/2-x} = 0; \quad (8)$$

$$-\varepsilon S \left. \frac{d\theta}{dz} \right|_{z=0} = P_1, P_2. \quad (9)$$

Условие (8) указывает на отсутствие перегрева термостата относительно окружающей среды, что соответствует принятому выше упрощению – равенству нулю термического сопротивления термостата. Условие (9) характеризует тепловые потоки P_1 и P_2 , распространяющиеся соответственно слева и справа от области поглощения потока излучения P_0 . При этом

$$P_1 + P_2 = \varepsilon P_0, \quad (10)$$

где ε – поглощательная способность коллектора энергии.

Перегревы горячих концов ветвей термопар первой θ_1 и второй θ_2 ТЭБ находим как перегревы преобразовательного элемента в точках с координатами $z = B/2 + x$, $z = B/2 - x$, соответственно. Тогда с учетом (10) и подстановки θ_1 и θ_2 в (4) и (5) находим

$$S^+ = \frac{\varepsilon \alpha N \operatorname{sh}(bl_{\tau})}{\varepsilon S b \operatorname{ch}(bL/2)} \operatorname{ch}(bx) = A \operatorname{ch}(bx); \quad (11)$$

$$S^- = \frac{\varepsilon \alpha N \operatorname{sh}(bl_{\tau})}{\varepsilon S b \operatorname{sh}(bL/2)} \operatorname{sh}(bx) = C \operatorname{sh}(bx). \quad (12)$$

Из соотношения (11) следует, что коэффициент преобразования ПИП изменяется в пределах коллектора энергии, т. е. зонная характеристика неравномерная, и разброс значений этого коэффициента (неравномерность зонной характеристики) возрастает с увеличением параметра распределенных тепловых потерь. Для расчета нелинейности координатной характеристики используют координатную зависимость ее крутизны

$$S_x^- = \frac{d}{dx} S^- = \frac{\varepsilon \alpha N \operatorname{sh}(bl_{\tau})}{\varepsilon S \operatorname{sh}(bL/2)} \operatorname{ch}(bx) = C b \operatorname{ch}(bx). \quad (13)$$

Из соотношения (13) можно сделать вывод о том, что крутизна координатной характеристики (координатная чувствительность) планарного ПИП в пределах коллектора энергии изменяется, т. е. она

нелинейная, и разброс значений координатной чувствительности (ее нелинейность) также возрастает с увеличением параметра распределенных потерь. При этом особо отметим, что координатные зависимости крутизны координатной характеристики и неравномерности зонной характеристики описываются одной и той же функцией $\text{ch}(bx)$.

Из (11) и (13) следует, что коэффициент преобразования и координатная чувствительность планарного ПИП возрастают при увеличении поглощательной способности коллектора энергии, удельной термоЭДС термопары и количества термопар в ТЭБ. Рассмотрение вопросов, связанных с оптимизацией перечисленных параметров, выходит за рамки данной работы. Отметим только, что вариации поглощательной способности коллектора энергии, удельной термоЭДС и количества термопар в ТЭБ в достаточно широком диапазоне их значений не влияют на параметр распределенных тепловых потерь и вид координатных зависимостей коэффициента преобразования и координатной чувствительности ПИП.

Неравномерность зонной характеристики рассматривают как составляющую неисключенной систематической погрешности (НСП) и рассчитывают по формуле [10]:

$$H^+ = \theta_{xy} = \left| \frac{S_{[\max, \min]}^+ - S_{\text{cp}}^+}{S_{\text{cp}}^+} \right|, \quad (14)$$

где $S_{[\max, \min]}^+$ – наибольшее отклонение от среднего значения коэффициента преобразования; S_{cp}^+ – среднее значение коэффициента преобразования планарного ПИП, установленное в пределах всего коллектора энергии.

Нелинейность координатной характеристики предлагаем считать как еще одну НСП, значение которой можно рассчитать по формуле, аналогичной (14):

$$H_x^- = \theta_x^- = \left| \frac{(S_x^-)_{[\max, \min]} - (S_x^-)_{\text{cp}}}{(S_x^-)_{\text{cp}}} \right|, \quad (15)$$

где $(S_x^-)_{[\max, \min]}$ – наибольшее отклонение от среднего значения координатной чувствительности; $(S_x^-)_{\text{cp}}$ – среднее значение координатной чувствительности планарного ПИП, установленное в пределах всего коллектора энергии.

Из соотношений (14), (15) следует, что $H^+ = H_x^-$. Введем общее для них обозначение a и установим его связь с физико-техническими параметрами планарного ПИП с использованием коэффициента преобразования. При этом ограничимся случаем, когда коэффициент преобразования изменяется только вдоль оси x , т. е. при $S^+(x, y)|_{x=x_0} = \text{const}$. Тогда согласно (11)

$$S_{\text{cp}}^+ = (1/B) \int_{-B/2}^{+B/2} A \text{ch}(bx) dx = A \text{sh}(bB/2) / (bB/2); \quad (16)$$

$$S_{\text{max}}^+ = A \text{ch}(bB/2) > S_{\text{min}}^+ = A \quad (17)$$

и (14) принимает вид

$$a = \frac{\text{ch}(bB/2)}{\text{sh}(bB/2)} (bB/2) - 1. \quad (18)$$

С учетом (7) получаем трансцендентное уравнение, связывающее метрологический параметр a с основными физико-техническими параметрами планарного ПИП:

$$\left(\frac{B}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{\Sigma}}{xh}} \right) \text{ch} \left(\frac{B}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{\Sigma}}{xh}} \right) / \text{sh} \left(\frac{B}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{\Sigma}}{xh}} \right) = 1 + a. \quad (19)$$

На начальном этапе проектирования планарного ПИП с требуемыми метрологическими характеристиками полученные в виде алгебраических функций соотношения (11) – (13) и (19) позволяют определять границы интервалов допустимых значений физико-технических параметров ПИП. Покажем это на примере определения максимального линейного размера коллектора энергии – важнейшего метрологического параметра широкоапертурных (с диаметром входного окна 25 мм и более [1 – 6]) лазерных ваттметров. При этом учтем, что неравномерность зонной характеристики лучших моделей широкоапертурных лазерных ваттметров не превышает 0,5 % [1, 2, 5, 6]. Решение уравнения (19) при $a = 0,005$, преобразованное для удобства расчета длины коллектора энергии, имеет вид

$$B = 0,2452\sqrt{\kappa h/\alpha_{\Sigma}}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что длина коллектора энергии может быть увеличена благодаря увеличению теплопроводности материала преобразовательного элемента и его толщины, а также уменьшению суммарного коэффициента теплоотдачи. Наиболее подходящим материалом для изготовления преобразовательного элемента является широко используемый в планарной технологии монокристаллический кремний. Кремний выгодно отличается от других монокристаллических полупроводников высокой теплопроводностью: при комнатной температуре $\kappa = 136 \text{ Вт/(м·К)}$ [11]. Толщина стандартной кремниевой пластины диаметром более 100 мм составляет 0,6 мм. Однако возможно изготовление пластин толщиной до 2 мм. Суммарный коэффициент теплоотдачи определяют, как правило, экспериментальным путем, но в случае простых конфигураций систем тел, участвующих в процессе теплообмена, возможен расчет его усредненного значения. Именно такую конфигурацию имеют преобразовательный элемент и термостат однокоординатного планарного ПИП. Расчетным путем с погрешностью 10 % получено значение усредненного суммарного коэффициента теплоотдачи преобразовательного элемента с квадратным коллектором энергии $\overline{\alpha_{\Sigma}} = 7,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. При указанных выше значениях параметров κ , h , $\overline{\alpha_{\Sigma}}$ из (20) находим максимальную длину коллектора энергии $B_{\max} = 25,6 \text{ мм}$. Это значение $B_{\max}$ совпадает с нижней границей диапазона диаметра входного окна широкоапертурных лазерных ваттметров.

Значительное увеличение размеров коллектора энергии можно обеспечить использованием более толстых преобразовательных элементов. Так, при толщине пластины 1 мм длина $B_{\max}$ возрастает до 33 мм, а при $h = 2 \text{ мм}$ – до 45 мм. Дальнейшее увеличение толщины преобразовательного элемента представляется нецелесообразным по двум причинам: во-первых, согласно (11) – (13) это приводит к значительному уменьшению коэффициента преобразования и координатной чувствительности; во-вторых, существенно затрудняет процесс разделения пластины для получения преобразовательных элементов прямоугольной и квадратной форм.

С целью подтверждения результатов расчетов были проведены натурные измерения координатных характеристик планарных ПИП с двумя ТЭБ. Лазерный пучок имел форму «лазерного ножа». Определены неравномерности зонной характеристики планарных ПИП с коллектором энергии толщиной 0,6 мм и продольными размерами 14×14 и 28×16 мм, соответственно 0,3 и 0,6 %.

Таким образом, на базе планарных ПИП возможно создание широкоапертурных координатно-чувствительных лазерных ваттметров с высокими метрологическими параметрами и характеристиками.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Фирма Coherent** [Электрон. ресурс]. <http://www.coherent.com/Lasers/index.cfm?fuseaction=show.page&id=830> (дата обращения: 18.11.10).
2. **Фирма Ophir Optronics** [Электрон. ресурс]. <http://www.ophiropt.com/laser-measurement> (дата обращения: 18.11.10).
3. **De Meis R.** Choose the right detector and meter to test beam strength // Laser Focus World. 1995. June. P. 105 – 113.
4. **Фирмы Scientech** [Электрон. ресурс]. <http://www.scientechinc.com/laserpower.phtml> (дата обращения: 18.11.10).
5. **Козаченко М. Л.** Высоточные широкоапертурные калориметрические измерительные преобразователи средней мощности лазерного излучения и созданные на их базе измерительные системы // Измерительная техника. 2000. № 3. С. 35 – 39; **Kozachenko M. L.** Precision wide-aperture calorimetric transducer of mean laser emissive power and associated measurements systems // Measurement Techniques. 2000. V. 43. N 3. P. 244 – 249.
6. **Козаченко М. Л.** Высоточные широкоапертурные калориметрические измерительные преобразователи больших уровней энергии лазерного излучения // Измерительная техника. 2007. № 1. С. 28 – 33; **Kozachenko M. L.** Precision high-aperture calorimetric sensors for high-energy laser beams // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N 1. P. 38 – 43.
7. **Филачев А. М. и др.** Инфракрасные матрицы и тенденции их развития. Ч.1 // Прикладная физика. 2003. № 1. С. 105 – 120.
8. **Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Челибанов В. П.** Приемники излучения. СПб.: «Папирус», 2003.
9. **Загорский Я. Т., Котюк А. Ф.** Основы метрологического обеспечения лазерной энергетической фотометрии. М.: Изд-во стандартов, 1990.
10. **Золотаревский Ю. М., Мнев И. В., Улановский М. В.** Исследование метрологических характеристик калориметрических преобразователей энергии лазерного излучения // Измерительная техника. 2002. № 4. С. 19 – 22; **Zolotarevskii Yu. M., Mnev I. V., Ulanovskii M. V.** Investigation of the metrological characteristics of calorimetric transducers of laser radiation energy // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 4. P. 363 – 368.
11. **Охотин А. С., Пушкарский А. С., Горбачев В. В.** Теплофизические свойства полупроводников. М.: Атомиздат, 1972.

Дата принятия 30.11.2010 г.