

кристаллического кремния ГСО 10030—2011, предназначенного для калибровки ПЭМ в диапазоне увеличений 1000 — 1500000[×]. Два параметра ГСО — шаг шаговой структуры и расстояние между плоскостями (111) монокристаллического кремния в материале образца — независимо прослеживаются к единице длины — метру.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 16.552.11.7038) с применением оборудования центра коллективного пользования НИЦПВ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы».

Л и т е р а т у р а

1. **Утевский Л. М.** Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973. С. 31.

2. **Williams D., Carter C.** Transmission electron microscopy. A textbook for materials science. N.Y.: Springer Science+Business Media, 2009. P. 164.

3. **Новиков Ю.А. и др.** Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. 2006. Т. 62. С. 36—76.

4. **NIST 2008 SRM 2000:** Calibration standard for high-resolution x-ray diffraction. P. 1—11.

5. **ГОСТ Р 8.631—2007.** ГСИ. Микроскопы электронные измерительные. Методика поверки.

6. **ГОСТ Р 8.629—2007.** ГСИ. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецидальным профилем элементов. Методика поверки.

Дата принятия 16.07.2012 г.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.786.3

Метод устранения влияния магнитного поля в лазерном динамическом гониометре

Е. М. ИВАЩЕНКО, П. А. ПАВЛОВ

С.-Петербургский государственный электротехнический университет,
С.-Петербург, Россия, e-mail: pavl-petr@yandex.ru

Предложен метод исключения систематической погрешности кольцевого лазера, вызванной влиянием магнитного поля, который основан на реверсивном характере вращения лазера. Представлены результаты экспериментальных исследований, которые показали эффективность применения метода реверсивного вращения.

Ключевые слова: лазерный динамический гониометр, угловые измерения, систематическая погрешность.

The method of elimination of systematic error of ring laser caused by magnetic field influence based on the reverse nature of laser rotation is suggested. The experimental study results showing the reverse rotation method effectiveness are presented.

Key words: dynamic laser goniometer, angle measurements, systematic error.

Развитие лазерной динамической гониометрии послужило основой для создания ряда прецизионных углоизмерительных установок [1], а также промышленного образца гониометра ДГ-03Л [2]. Этот лазерный динамический гониометр (ЛДГ), предназначен для измерения плоских углов между гранями призматических мер (ПМ) и внесен в Государственный реестр средств измерений под номером № 43296—09.

В состав ЛДГ входит вращающийся с квазипостоянной скоростью кольцевой лазер (КЛ), частота выходного сигнала которого пропорциональна скорости его вращения относи-

тельно инерциального пространства. Интегрирование выходного сигнала КЛ создает виртуальную угловую шкалу, характеризующуюся высоким разрешением и равномерностью. Метрологические характеристики ЛДГ изучены в [3—5], откуда следует, что основными являются погрешность КЛ, вызванная внешним магнитным полем, и погрешность установки интерференционного нуля-индикатора (ИНИ). Обе эти погрешности носят систематический характер и сосредоточены на первой внутриоборотной гармонике. Применение метода кросс-калибровки [6] при измерении ПМ плоского

угла типа 4 [7] позволяет их устранить. Однако для ПМ типов 1—3 кросс-калибровка затруднена или вообще невозможна.

Ниже рассмотрен метод устранения систематической погрешности КЛ, позволяющий повысить точность измерений ЛДГ при отказе от кросс-калибровки и упрощении установки ИНИ в положение минимальной систематической погрешности.

Метод реверсивного вращения. В настоящее время ЛДГ используют для калибровки и поверки ПМ плоского угла и датчиков угла (ДУ), работа которых основана на различных физических принципах (оптических, магнитных, механических и т. д.) [8]. Обобщенная схема ЛДГ приведена на рис. 1; подробное описание его работы представлено в [1, 5, 9]. Принцип измерений ЛДГ заключается в фиксации углового положения шпинделя, вращающегося с квазипостоянной скоростью, путем формирования преобразователем угла импульсов, которые определяют интервал интегрирования выходного сигнала КЛ. Многогранная призма (МП) 2, КЛ 7 и ДУ 5 закреплены на шпинделе 4 ЛДГ. Привод, состоящий из двигателя 6 и системы управления 9, осуществляет вращение шпинделя с заданной скоростью. Выходные сигналы ДУ, КЛ и ИНИ пропускаются через соответствующие преобразователи и направляются в интерфейс, в котором происходит предварительная обработка данных (в блоке электроники 8) и передача в персональный компьютер 10. Входящий в состав гониометрической системы ИНИ выполняет определение направления нормалей к граням МП в процессе ее калибровки [4].

Рассмотрим погрешность ЛДГ в случае калибровки датчика угла и ПМ плоского угла. При этом будем учитывать систематические погрешности, вызванные неравномерностью шкал — угловой КЛ, зависящей от внешнего магнитного поля, и ДУ, обусловленной погрешностью изготовления и качеством установки датчика на ось гониометра, а также погрешностью установки ИНИ.

Режим калибровки датчика угла. Систематическая погрешность измерения угла поворота шпинделя в основном складывается из погрешностей ДУ и КЛ при вращении шпинделя по ($\Delta(\varphi_i)$) и против ($\Delta(\varphi_j)$) часовой стрелки и имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta(\varphi_i) &= \Delta_{ДУ}(\varphi_i) + \Delta_{КЛ}(\varphi_i); \\ \Delta(\varphi_j) &= \Delta_{ДУ}(\varphi_j) + \Delta_{КЛ}(\varphi_j), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta_{ДУ}(\varphi_i)$, $\Delta_{ДУ}(\varphi_j)$, $\Delta_{КЛ}(\varphi_i)$, $\Delta_{КЛ}(\varphi_j)$ и φ_i , φ_j — систематические погрешности ДУ, КЛ и углы поворота шпинделя ЛДГ, отсчитанные от нулевой метки при вращении по и против часовой стрелки, соответственно.

Систематическую погрешность ДУ представляют как отклонение действительного значения угла φ_d от его номинального значения φ_n :

$$\begin{aligned} \Delta_{ДУ}(\varphi_i) &= \varphi_d - \varphi_n; \\ \Delta_{ДУ}(\varphi_j) &= \varphi_{jd} - \varphi_{jn}, \end{aligned} \quad (2)$$

где φ_{jd} , φ_{jn} — действительные углы ДУ, отсчитанные в выбранном направлении вращения; $\varphi_{in} = i2\pi/N$; $\varphi_{jn} = j2\pi/N$ — номинальные углы; $2\pi/N$ — дискретность отсчета ДУ.

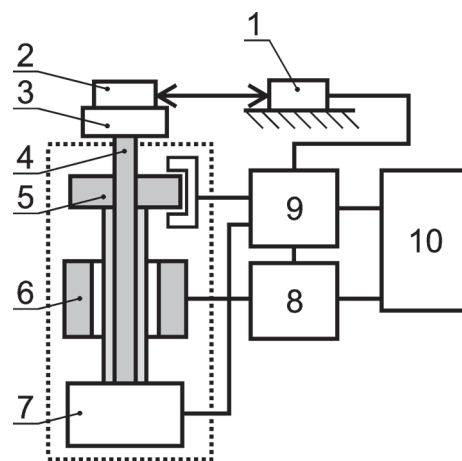


Рис. 1. Функциональная схема ЛДГ:

1 — интерференционный нуль-индикатор; 2 — многогранная призма; 3 — юстируемый столик; 4 — шпиндель системы; 5 — датчик угла; 6, 8 — двигатель и система управления им; 7 — кольцевой лазер; 9 — электронный блок; 10 — персональный компьютер

При этом выполняются условия

$$\varphi_{id} + \varphi_{jd} = 2\pi; \quad (3)$$

$$j + i = N. \quad (4)$$

Из (2)—(4) следует, что при вращении против и по часовой стрелке систематическая погрешность ДУ отличается знаком:

$$\Delta_{ДУ}(\varphi_i) = -\Delta_{ДУ}(\varphi_{N-j}). \quad (5)$$

Согласно результатам исследований, полученным в [10], систематическая погрешность КЛ в основном сосредоточена на первой гармонике частоты его вращения. При вращении по и против часовой стрелки зависимость погрешности от угла поворота имеет вид

$$\Delta_{КЛ}(\varphi_i) = A \cos(-\varphi_i + \varphi_0); \quad (6)$$

$$\Delta_{КЛ}(\varphi_j) = A \cos(\varphi_j + \varphi_0), \quad (7)$$

где $\Delta_{КЛ}(\varphi_{i,j})$ — систематическая погрешность КЛ при вращении по и против часовой стрелки, соответственно; A — амплитуда первой гармоники КЛ; φ_0 — начальная фаза систематической погрешности.

При этом амплитуда зависит от внешнего магнитного поля и скорости вращения КЛ, а начальная фаза — от его ориентации в магнитном поле. Тогда из (3), (6), (7) следует

$$\Delta_{КЛ}(\varphi_i) = \Delta_{КЛ}(\varphi_{N-j}). \quad (8)$$

Таким образом, систематическая погрешность КЛ не зависит (см. (8)), а систематическая погрешность ДУ зависит (см. (5)) от выбранного направления вращения. Эти свойства легли в основу метода реверсивного вращения, который позволяет исключить систематическую погрешность КЛ.

Из (1) с учетом (5), (8) получим выражения для систематических погрешностей КЛ и ДУ:

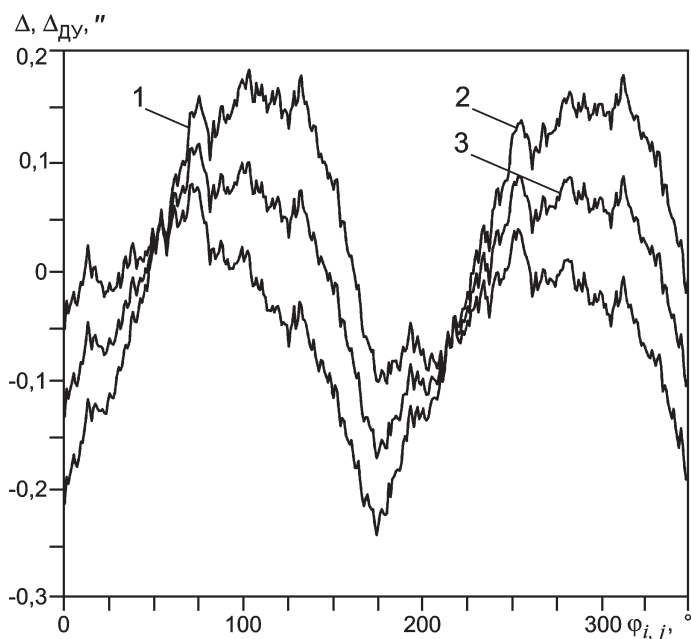


Рис. 2. Систематические погрешности:

ЛДГ при вращении лазера по и против часовой стрелки — кривые 1, 2, соответственно; оптического ДУ — кривая 3

$$\Delta_{\text{КЛ}}(\varphi_i) = [\Delta(\varphi_i) - (-\Delta(\varphi_{N-j}))]/2; \quad (9)$$

$$\Delta_{\text{ДУ}}(\varphi_i) = [\Delta(\varphi_i) + (-\Delta(\varphi_{N-j}))]/2. \quad (10)$$

Следовательно, для исключения систематической погрешности КЛ необходимо:

найти систематическую погрешность измерения угла поворота шпинделя ЛДГ при его вращении против и по часовой стрелке;

обеспечить однозначность отсчетов по и против часовой стрелки, т. е. провести преобразование: $\Delta(\varphi_i) \rightarrow -\Delta(\varphi_{N-j})$.

Режим калибровки призматических мер плоского угла. Для этого в ЛДГ используют ИНИ, который вносит дополнительную систематическую погрешность, сосредоточенную на частоте вращения КЛ [4]. Таким образом, систематическая погрешность измерения угла поворота шпинделя ЛДГ будет складываться из погрешностей ПМ плоского угла, КЛ и ИНИ. При вращении шпинделя по и против часовой стрелки систематическую погрешность ЛДГ представим в виде

$$\begin{aligned} \Delta(\varphi_i) &= \Delta_{\text{ПМ}}(\varphi_i) + \Delta_{\text{КЛ}}(\varphi_i) + \Delta_{\text{ИНИ}}(\varphi_i); \\ \Delta(\varphi_j) &= \Delta_{\text{ПМ}}(\varphi_j) + \Delta_{\text{КЛ}}(\varphi_j) + \Delta_{\text{ИНИ}}(\varphi_j). \end{aligned} \quad (11)$$

Если под систематической погрешностью ПМ понимать угол между нормалью к ее грани, определяемой идеальным устройством считывания, и к грани идеальной ПМ, то, как и в случае ДУ, будет справедливо равенство

$$-\Delta_{\text{ПМ}}(\varphi_{N-j}) = \Delta_{\text{ПМ}}(\varphi_i). \quad (12)$$

При несовпадении измерительных плоскостей ИНИ и ПМ возникает дополнительная погрешность $\Delta_{\text{ИНИ}}$, поведение

которой при изменении направления вращения описывается выражением, аналогичным (5), (12):

$$-\Delta_{\text{ИНИ}}(\varphi_{N-j}) = \Delta_{\text{ИНИ}}(\varphi_i). \quad (13)$$

С учетом (8), (11) — (13) имеем

$$\Delta_{\text{КЛ}}(\varphi_i) = [\Delta(\varphi_i) - (-\Delta(\varphi_{N-j}))]/2; \quad (14)$$

$$\Delta_{\text{ПМ}}(\varphi_i) + \Delta_{\text{ИНИ}}(\varphi_i) = [\Delta(\varphi_i) + (-\Delta(\varphi_{N-j}))]/2. \quad (15)$$

Из (14), (15) следует, что рассмотренный метод реверсивного вращения позволяет:

найти и исключить систематическую погрешность КЛ при измерении ПМ плоского угла;

создать новую методику установки измерительной плоскости ИНИ для ЛДГ, отличающуюся от известной методики [5] простотой и достоверностью.

Отметим, что проблема установки измерительной плоскости ИНИ заключается в том, что, как и у КЛ, существуют гармонические составляющие погрешности ИНИ на частоте вращения, что создает трудности по их взаимному разделению. Применение реверсивного метода позволяет исключить влияние магнитного поля на КЛ и, таким образом, использовать методику установки ИНИ, применяемую в динамическом гониометре [4].

Методика установки ИНИ заключается в нахождении угла наклона его измерительной плоскости, при котором амплитуда первой гармоники в систематической погрешности измерения углов аттестованной МП равна нулю. Эту погрешность представляют как разность между измеренными согласно (15) и действительными значениями углов, определяемыми из паспорта МП. Амплитуда первой гармоники выделяется из полученной разности с использованием методов аппроксимации и наименьших квадратов. Угол наклона ИНИ, при котором амплитуда первой гармоники равна или близка к нулю, определяет измерительную плоскость ИНИ.

Экспериментальные исследования метода реверсивного вращения проводили на ЛДГ (см. рис. 1), в состав которого входили КЛ типа ГЛ-1, восьмигранная МП, оптический ДУ типа ПКГ-105М с ценой деления 4" и систематической погрешностью, не превышающей $\pm 0,2''$.

Режим калибровки оптического ДУ. Исследования проводили в течение 25 оборотов шпинделя ЛДГ, данные КЛ снимали через равные угловые интервалы, задаваемые сигналами ДУ. На рис. 2 представлены результаты измерения углов при вращении КЛ по и против часовой стрелки со скоростью около 70 °/с. Кривые 1, 2 соответствуют систематическим погрешностям ЛДГ: определяемой (1) и при вращении КЛ против часовой стрелки, а также измеренной при вращении КЛ по часовой стрелке, но приведенной к вращению против часовой стрелки согласно (5). Кривая 3 — систематическая погрешность оптического ДУ, вычисленная по (10).

Несовпадение кривых 1, 2 вызвано систематической погрешностью КЛ, описываемой (9). Отметим, что амплитуда этой погрешности при постоянном внешнем магнитном поле зависит от скорости вращения КЛ [11, 12]. Применение реверсивного вращения позволило определить зависимость амплитуды первой гармоники систематической погрешности КЛ от времени его оборота (рис. 3) и установить ее линейность, что соответствует результатам измерений, представ-

ленным в [11, 12]. Однако различаются значения амплитуды, что объясняется большим влиянием магнитного поля на КЛ, поскольку штатное экранирование магнитного поля в ГЛ-1 было ослаблено.

Дополнительные измерения систематической погрешности КЛ, проведенные в одних условиях, с использованием оптических ДУ и восьмигранной призмы с ИНИ показали их совпадение в пределах случайной погрешности измерений. Это позволяет сделать вывод о достоверности выражений (9), (14).

Режим калибровки оптической призмы. На рис. 4 представлены систематические погрешности ЛДГ при калибровке восьмигранной оптической призмы: измеренная (кривая 1) и полученные с компенсацией систематической погрешности КЛ методом реверсивного вращения (кривая 2), а также после установки измерительной плоскости ИНИ согласно приведенной выше методике и компенсации погрешности КЛ (кривая 3). Из рис. 4 следует, что метод реверсивного вращения позволяет использовать упрощенную методику установки ИНИ и тем самым уменьшить систематическую погрешность ЛДГ при калибровке ПМ плоского угла в 3—5 раз.

Обсуждение результатов. Рассмотрим погрешность метода реверсивного вращения, которая возникает вследствие зависимости амплитуды систематической погрешности КЛ от внешнего магнитного поля и скорости вращения лазера. Если скорости вращения по и против часовой стрелки не совпадают, то для амплитуды (6) и фазы (7) будут выполняться соотношения $A_i \neq A_j$, $\varphi_i \neq \varphi_j$. В результате сложения в соответствии с (10) не произойдет полной компенсации погрешности КЛ. Амплитуду и фазу остаточной первой гармоники можно найти с учетом (10) по формулам [13]:

$$A_n = 0,5 \sqrt{A_i^2 + A_j^2 + 2A_i A_j \cos(\varphi_i - \varphi_j)};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_n = (A_i \sin \varphi_i + A_j \sin \varphi_j) / (A_i \cos \varphi_i + A_j \cos \varphi_j). \quad (16)$$

Введем новые переменные

$$A_0 = (A_i + A_j) / 2; \Delta A = (A_i - A_j) / 2; \varphi_0 = (\varphi_i + \varphi_j) / 2;$$

$$\Delta \varphi = (\varphi_i - \varphi_j) / 2. \quad (17)$$

Как правило, разница скоростей вращений по и против часовой стрелки незначительная и, следовательно, разница в амплитудах и фазах также будет незначительной: $A_i \approx A_j$, $\varphi_i \approx \varphi_j$, т. е. $\Delta A \ll A_0$, $\Delta \varphi \ll \varphi_0$.

Подставив новые переменные (17) в (16) и ограничившись величинами первого порядка малости, получим соотношения для оценки амплитуды и фазы остаточной первой гармоники, которые характеризуют погрешность метода реверсивного вращения:

$$A_n = \sqrt{(\Delta A)^2 + A_0^2 (\Delta \varphi)^2};$$

$$(\operatorname{tg} \varphi_n)^{-1} = \Delta A / A_0 - \Delta \varphi \operatorname{tg} \varphi_0. \quad (18)$$

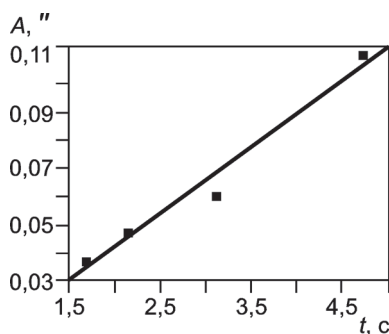


Рис. 3. Зависимость амплитуды первой гармоники систематической погрешности лазера от времени его оборота

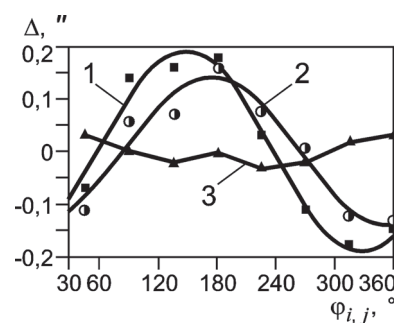


Рис. 4. Систематические погрешности ЛДГ при калибровке восьмигранной оптической призмы: полная (кривая 1); после компенсации систематической погрешности лазера (кривая 2); после компенсации и установки измерительной плоскости нуля-индикатора (кривая 3)

Для проверки достоверности соотношений (18) методом реверсивного вращения были проведены измерения углов при помощи оптического ДУ, когда крышка и защитный экран КЛ были сняты. При этом влияние внешнего магнитного поля на КЛ усиливалось, амплитуда его систематической погрешности увеличивалась, а погрешность ее оценки уменьшалась.

Результаты измерений и расчетов по (18) представлены ниже в табличном виде.

A_p , "	A_r , "	φ_p , °	φ_r , °	$A_n^{\text{ИЗМ}}$, "	$A_n^{\text{РАСЧ}}$, "	$\varphi_n^{\text{ИЗМ}}$, °	$\varphi_n^{\text{РАСЧ}}$, °
-1,961	1,857	38,57	34,97	-0,072	-0,080	84,10	89,70

Здесь измеренные амплитуду и фазу погрешности метода реверсивного вращения определяли по разнице между систематическими погрешностями ДУ, полученными методами реверсивного вращения и кросс-калибровки. Погрешность определения амплитуды не превышает 0,01", а ее оценка соответствует среднему квадратическому отклонению случайной погрешности результата измерения.

Использование КЛ с защитной крышкой и магнитным экраном, как в ЛДГ, снижает систематическую погрешность КЛ до уровня 0,1" и менее, что уменьшает погрешность метода реверсивного вращения, и она не будет превышать случайную погрешность измерений ЛДГ.

Таким образом, метод реверсивного вращения устраняет систематическую погрешность КЛ, упрощает процедуру установки ИНИ, повышает точность лазерных гониометрических систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (государственный контракт № 16.740.11.0721).

Л и т е р а т у р а

1. Павлов П. А. Разработка и исследование высокоточных гониометрических систем: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. СПб., 2008.

2. Лазерный динамический гониометр ДГ-03Л [электрон. ресурс]. <http://www.goniometer.ru/dg-03l.html> (дата обращения: 10.03.2012).

3. Павлов П. А. Анализ алгоритмов измерений лазерным динамическим гониометром // Измерительная техника. 2008. № 1. С. 17—20; Pavlov P. A. Laser dynamic goniometer measurement algorithms // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 1. P. 22—27.

4. Павлов П. А. О способе уменьшения систематической погрешности определения направления интерференционным нуль-индикатором // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Приборостроение и информационно-измерительные системы. 2006. С. 34—37.

5. Бачиш Е. А., Павлов П. А. Исследование метрологических характеристик лазерного динамического гониометра // Измерительная техника. 2009. № 5. С. 19—23; Barchish E. A., Pavlov P. A. Laser dynamic goniometer metrological characteristics // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 5. P. 465—471.

6. Sim P. J. Modern Techniques in Metrology // World Scientific. Singapore, 1984. P. 102—121.

7. ГОСТ 2875—88. Меры плоского угла призматические.

8. Бурнашев М. Н. и др. Лазерные системы динамической аттестации угловых преобразователей различного типа // Изв. ГЭТУ. 1997. Вып. 509. С. 36—40.

9. Бурнашев М. Н. и др. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 2. С. 141—146.

10. Кривцов Е. П., Филатов Ю. В. Исследование погрешности воспроизведения единицы плоского угла кольцевым лазером // Измерительная техника. 1989. № 12. С. 11—12; Krivtsov E. P., Filatov Yu. V. Errors in reproducing the planar angle unit with a ring laser // Measurement Techniques. 1989. V. 32. N 12. P. 1140—1142.

11. Баринаева Е. А. Разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / СПб., 2009.

12. Баринаева Е. А., Иващенко Е. М., Павлов П. А. Кольцевой лазер в прецизионных угловых измерениях // Лазеры. Измерения. Информация 2011: Сборник докл. 21-й Междунар. конф. 2011. Т. 1. С. 62—75.

13. Феликс Л. и др. Справочник студента по математике. М.: Высшая школа, 2011.

Дата принятия 15.05.2012 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

389.6:681.2.082.083

Метод калибровки средств измерений параметров качества лазерного пучка

К. Ш. АБДРАХМАНОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: tiratron@vniiofi.ru

Описан метод калибровки средств измерений пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения.

Ключевые слова: энергия, диаметр, расходимость и коэффициенты распространения пучка.

The method of measuring instruments calibration for spatial-power characteristics of laser radiation measurements is described.

Key words: energy, beam diameter, beam divergence and propagation ratios.

В последнее десятилетие наблюдается серьезный прогресс в разработке, выпуске и продаже импульсных твердотельных лазеров и систем на их основе. К числу основных физических величин и параметров, по которым сертифицируются импульсные лазеры, относятся энергия, длительность импульса, длина волны, совокупность параметров, характеризующих качество пучка — распределение плотности энергии (РПЭ), угол расходимости, ширина, параметр M^2 и др. По мере совершенствования импульсной лазерной техники, расширения динамического, временного и спектрального диапазонов измерения энергии, параметров качества пучка, длительности импульса и длины волны излучения увеличились номенклатура и количество выпускаемых десятками зарубежных фирм лазерных джоульметров и других средств измерений (СИ) указанных выше величин.

В России и за рубежом создан соответствующий парк рабочих и первичных эталонов, рабочих СИ в области лазер-

ной радиометрии, а также разработаны и введены в обращение международные стандарты на терминологию и методы выполнения измерений параметров лазерных пучков. Так, в соответствии с [1] изготовитель должен указать в документации на лазерную систему 15 характеристик лазерного излучения, 7 из которых являются пространственными. Следует отметить, что в составе СИ параметров качества пучка все чаще присутствуют ПЗС-системы, от метрологических характеристик которых зависит точность определения основных параметров излучения. Поэтому во ФГУП «ВНИИОФИ» был разработан метод калибровки СИ пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения (СИПЭХ). Данный метод можно применять при калибровке указанных СИ, работающих в диапазоне длин волн 0,3 — 2,0 мкм. Определение метрологических характеристик проводится на государственном первичном эталоне (ГПЭ) единиц энергии, распределения плотности энергии,