

5. Кирсанов Э. А., Сирота А. А. Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга: статистический и нейросетевой подходы. М.: Физматлит, 2012.

6. Татузов А. Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника, 2009.

7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002.

8. Фролов И. И., Садыхов Р. Х. Построение классификатора на основе машины опорных векторов для распознавания символов // Докл. Белорусского гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 103—108.

9. Scholkopf B. e. a. Advances in Kernel Methods. Support Vector Learning. Cambridge (USA): MIT Press, 1998.

Дата принятия 06.11.2013 г.

389.001:621.384

Ослабитель лазерного излучения на основе четырех призм Дове

Т. В. ИСАЕВА, А. А. КОВАЛЕВ, А. А. ЛИБЕРМАН, А. С. МИКРЮКОВ,
С. А. МОСКАЛЮК, М. В. УЛАНОВСКИЙ

Всероссийский научно-исследовательский институт опτικο-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: mrsergik@mail.ru

Рассмотрены конфигурации четырехпризменного ослабителя, которые обеспечивают компактность конструкции, существенно упрощают его юстировку и сборку. Показано, что наиболее удачной является четырехпризменная конфигурация с попарно параллельными рабочими гранями, при которой сохраняется направление распространения луча, обеспечивается промежуточный луч для контроля поляризации и коэффициента ослабления падающего излучения в процессе калибровки ослабителя.

Ключевые слова: френелевское отражение, ослабитель падающего луча, поляризация.

The configuration of attenuator based on four Dove prisms providing the design compactness and significantly simplifying the alignment and assembly are considered. It is shown that the most successful configuration of attenuator is with parallel in pairs reflecting surfaces of prisms. This configuration preserves the direction of beam propagation and provides the intermediate beam to control the polarization of the incident radiation and its attenuation coefficient during attenuator calibration.

Key words: fresnel reflection, incident beam attenuator, polarization.

В [1] представлена конструкция ослабителя лазерного излучения для коэффициента ослабления K порядка 10^{-3} , базирующаяся на двух призмах Дове, жестко закрепленных на поворотном столике. Основная особенность данного ослабителя заключается в методике его юстировки, позволяющей определять неизвестные параметры и рассчитывать углы юстировки, при которых K не зависит от поляризации падающего излучения, а также уточнять K системы для этого случая. Данная методика основана на геометрическом свойстве угла между двумя отражающими (рабочими) гранями: существует единственная пара углов падения луча, при которых плоскости отражения от каждой из граней перпендикулярны друг другу. Для идеальных призм Дове угол между отражающими гранями составляет 60° , однако для реальных призм он может отличаться на несколько градусов [1].

Основной недостаток такого ослабителя — непредсказуемость направления выходного луча. В идеальной конфигурации выходной луч направлен перпендикулярно падающему лучу, однако из-за неидеальности угла между рабочими гранями призмы его направление смещается. В связи с этим последовательное использование двух ослабителей для достижения коэффициента ослабления порядка 10^{-6} весьма затруднительно, поскольку для второго ослабителя, размещенного на другом поворотном столике, всю процедуру

юстировки необходимо выполнять заново в пучке ослабленного излучения.

Конфигурации ослабителя из четырех призм на одной платформе. Основные требования, предъявляемые к ослабителю, — это простота конструкции и несложная процедура его юстировки. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют конфигурации призм, представленные на рис. 1, а, б. Номера призм 1—4 соответствуют порядку отражения излучения от их граней. Там же показаны их основные характеристики.

Предложенные конструкции позволяют располагать призмы сонаправлено на одном столике вплотную друг к другу и к опоре, перпендикулярной плоскости столика. В принципе, за счет неточностей в изготовлении отдельных элементов, четырехпризменный ослабитель можно описать математической моделью с восемью неизвестными параметрами, а именно, углами γ , δ для каждой из призм (см. рис. 1). Для двухпризменного ослабителя в целях уменьшения числа неизвестных параметров призмы выбирают с одинаковыми γ , δ [1]. Основой практической реализации и теоретического расчета четырехпризменных конструкций является подбор отдельных пар призм ослабителя, при котором резко уменьшается количество неизвестных.

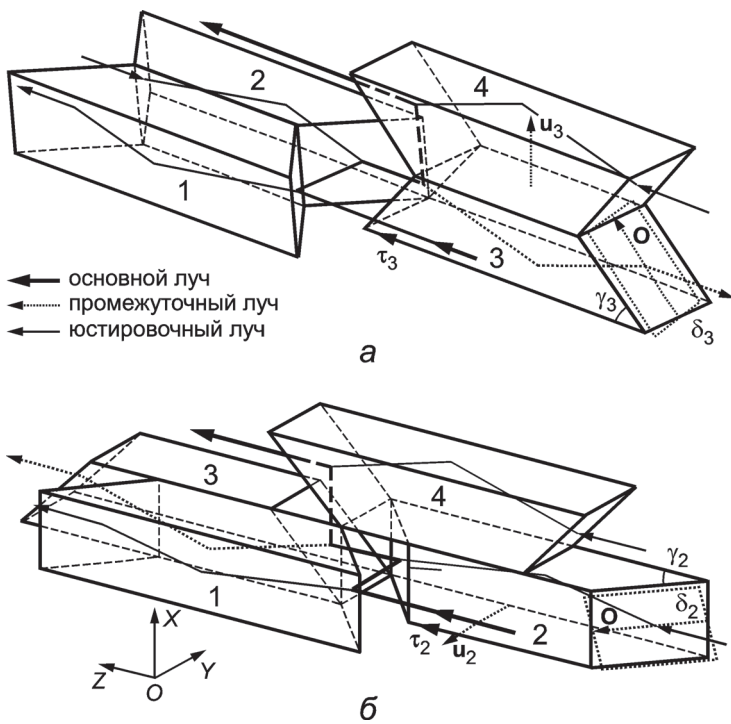


Рис. 1. Возможные конфигурации четырехпризменного ослабителя для сонаправленного расположения призм при попарно перпендикулярном (а) и попарно параллельном (б) расположении рабочих граней призм:

1—4 — призмы

При юстировке конструкции все призмы ослабителя перемещаются одновременно в монолитной конструкции. Первый вариант конфигурации (см. рис. 1, а) представляет попарно перпендикулярное расположение граней призм, а второй (см. рис. 1, б) — попарно параллельное. Для второй конфигурации пары призм подбирали по параллельности их рабочих граней. В каждом варианте должно соблюдаться следующее ограничение: отражение излучения происходит в одной плоскости на первой паре призм и в перпендикулярной плоскости на второй паре, что обеспечивает одинаковый K для вертикальной и горизонтальной составляющих поляризаций излучения, а также существование лишь двух конфигураций.

Математическая модель рассматриваемого ослабителя аналогична двухпризменной модели [1] и составлена на основе формализма векторных преобразований геометрической оптики [2]. Положение каждой призмы в пространстве задают два единичных вектора (см. рис. 1) $\mathbf{u}$, $\mathbf{\tau}$, а ее рабочую грань — углы γ , δ . Вектор $\mathbf{\tau}$ параллелен наиболее длинному ребру призмы и направлен в сторону ее рабочей грани. Вектор $\mathbf{u}$ перпендикулярен вектору $\mathbf{\tau}$ и является нормалью к верхней, наименьшей прямоугольной грани. Угол наклона боковых граней призмы равен γ . Угол скоса боковых граней призмы определим как вращение боковой грани призмы вокруг вектора $\mathbf{O}$ на угол δ . Вектор нормали к рабочей грани призмы вычислим по формуле

$$\sigma = M(\mathbf{O}, \delta) M([\mathbf{u}\mathbf{\tau}] / |[\mathbf{u}\mathbf{\tau}]|, \gamma) \mathbf{u}, \quad (1)$$

где $M(\mathbf{O}, \gamma)$ — матрица поворота относительно вектора $\mathbf{O}$ на угол γ [3].

Распространяющееся излучение задано вектором амплитуды электрического поля $\mathbf{E}$ и волновым вектором $\mathbf{k}$, направленным вдоль излучения. В момент отражения вектор $\mathbf{E}$ раскладывается на s - и p - составляющие, лежащие соответственно перпендикулярно и параллельно плоскости падения луча:

$$\mathbf{E}_s = \frac{[\sigma\mathbf{k}]}{|\sigma\mathbf{k}|} \left(\frac{[\sigma\mathbf{k}]}{|\sigma\mathbf{k}|} \mathbf{E} \right); \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_p = \mathbf{E} - \mathbf{E}_s. \quad (3)$$

Отраженный вектор электрического поля определим как

$$\mathbf{E}' = (\mathbf{E}_p - 2\sigma(\sigma\mathbf{E}_p))r_p + \mathbf{E}_s r_s, \quad (4)$$

где r_s , r_p — амплитудные коэффициенты отражения для s - и p -поляризаций, вычисляемые по формулам Френеля [4].

При последующем отражении излучения от поверхности разложение вектора $\mathbf{E}$ на $\mathbf{E}_s$ и $\mathbf{E}_p$ происходит повторно.

Отклонение направления вектора $\mathbf{k}$ падающего излучения от оси Z задают углами поворота α_x , α_y вокруг осей X , Y , соответственно. Все единичные векторы $\mathbf{u}$, $\mathbf{\tau}$ положений призм параллельны ортам системы координат и их направления легко определяют по рис. 1. Вычислив нормали отражающих плоскостей по (1) и применив последовательно формулы (2)—(4), находим коэффициент ослабления. Таким образом, для попарно параллельного расположения рабочих граней призм (см. рис. 1, б) получим

$$\mathbf{E}' = \frac{1}{(\sigma_{1x}^2 + \sigma_{1y}^2)^2 (\sigma_{3x}^2 + \sigma_{3y}^2)^2} \times \\ \times \begin{pmatrix} \sigma_{1y}^2 (r_{1s} - r_{1p}) + r_{1p} & \sigma_{1x}\sigma_{1y} (r_{1p} - r_{1s}) \\ \sigma_{1x}\sigma_{1y} (r_{1p} - r_{1s}) & \sigma_{1x}^2 (r_{1s} - r_{1p}) + r_{1p} \end{pmatrix}^2 \times \\ \times \begin{pmatrix} \sigma_{3y}^2 (r_{3s} - r_{3p}) + r_{3p} & \sigma_{3x}\sigma_{3y} (r_{3p} - r_{3s}) \\ \sigma_{3x}\sigma_{3y} (r_{3p} - r_{3s}) & \sigma_{3x}^2 (r_{3s} - r_{3p}) + r_{3p} \end{pmatrix}^2 \mathbf{E}, \quad (5)$$

где σ_1 , σ_3 — вектора нормалей отражающих поверхностей призм 1, 3 (приведены их координатные компоненты); r_{1s} , r_{1p} и r_{3s} , r_{3p} — амплитудные коэффициенты отражения для s - и p - поляризаций тех же призм [4].

При выводе (5) предполагалось

для пары призм 1—2: $\sigma_1 = -\sigma_2$, $r_{1s} = r_{2s}$, $r_{1p} = r_{2p}$;

для пары призм 3—4 соотношения аналогичны;

ось Z совпадает с направлением распространения падающего излучения, поэтому в матричном виде показаны преобразования только для компонент x и y вектора $\mathbf{E}$.

Аналогично (5) можно записать матричное выражение для ослабленного излучения при попарно перпендикулярном расположении рабочих граней призм.

Угловые зависимости коэффициента ослабления, полученные таким образом для двух конфигураций призм, показаны на рис. 2 и 3. Угловые зависимости попарно перпендикулярной конфигурации представляют слабо выраженные минимум и максимум для вертикальной и горизонтальной поляризаций, соответственно. Угловые зависимости для по-

парно параллельной конфигурации призм — это две пересекающиеся кривые.

Угловые зависимости (см. рис. 2) при попарно перпендикулярной конфигурации рассчитаны для идеального случая. Если углы призм неидеальны, то полученные экстремумы могут быть сдвинуты относительно идеального положения и даже пересекаться между собой. Поскольку глубина этих экстремумов крайне невелика, то юстировка ослабителя по ним из-за шумов чрезвычайно затруднена. Поэтому дальше в работе этот случай не рассматривается.

Во втором случае (см. рис. 3) угловые зависимости соответствуют квадрату аналогичных зависимостей для двухпризменной модели, рассмотренной в [1]. Следует отметить, что пересечение кривых, как и в двухпризменной модели, не соответствует положению ослабителя, при котором наблюдается независимость от поляризации падающего излучения, поскольку в данной точке может реализоваться эллиптическая поляризация с направлением главных осей под углом 45° к вертикали. Для вычисления положения ослабителя, в котором наблюдается независимость от поляризации, необходимо использовать его математическую модель.

В случае двухпризменного ослабителя угловые зависимости представляют две пересекающиеся кривые со слабо выраженной нелинейностью. Поскольку в случае рассматриваемых четырехпризменных ослабителей зависимости, показанные на рис. 3, квадратичные, то их нелинейность становится более выраженной. Из рис. 3 также следует, что K попарно параллельной конфигурации крайне чувствителен к юстировке, и для достижения точности K , равной 0,1 %, необходима точность юстировки ослабителя $18''$.

Сходство угловых зависимостей четырехпризменной модели с двухпризменной обеспечивает ее преемственность и позволяет использовать разработанную ранее методику юстировки и определения неизвестных параметров ослабителя. Эта методика при корректно собранной конструкции ослабителя обеспечивает независимость K от поляризации падающего излучения.

Рассматриваемый ослабитель имеет четыре отражающих поверхности, для которых положение в пространстве определяется четырьмя векторами нормалей. Поскольку рабочие поверхности попарно параллельны, то их характеризуют два вектора нормалей, соответствующие четырем скалярным параметрам. В [1] для двухпризменного ослабителя также используют четыре скалярных параметра: углы скоса двух призм, угол между этими призмами и угол поляризации падающего излучения (т. е. угол поворота системы вокруг оси распространения излучения). Поскольку в четырехпризменной системе угол между призмами отсутствует, то из соображений симметрии удобно в качестве параметров, характеризующих положения рабочих граней призм в пространстве, выбрать углы боковых граней γ_1, γ_2 призм 1—2, 3—4, соответственно, и углы скоса δ_1, δ_2 призм 1—2, 3—4. Некоторые из углов призм Дове показаны на рис. 1.

Рассматриваемая конфигурация благодаря попарной параллельности рабочих граней не искажает направления распространения излучения. Это обстоятельство облегчает юстировку данной конструкции ослабителя и ее встраивание в оптический тракт, а также имеется возможность подобрать призмы, обеспечивающие необходимую попарную параллельность граней.

При подборе призм для настройки попарной параллельности граней использовали камеру, объектив которой пред-

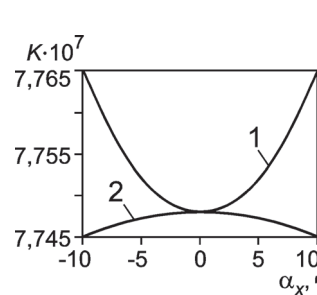


Рис. 2. Зависимость K от угла α_x для вертикальной (1) и горизонтальной (2) составляющих поляризации при попарно перпендикулярной конфигурации рабочих граней призм

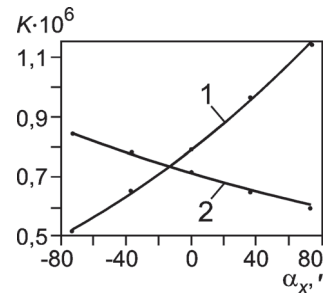


Рис. 3. Теоретическая аппроксимация зависимости K от угла α_x для вертикальной (1) и горизонтальной (2) составляющих поляризации ослабляемого излучения при попарно параллельной конфигурации рабочих граней призм

варительно был настроен на бесконечность. Процедура заключалась в следующем: вначале устанавливали призму 3 (см. рис. 1, б), далее камерой фиксировали пучок излучения, проходящего через эту призму; затем подбирали призмы 1, 2 таким образом, чтобы пучок, отраженный от них и прошедший сквозь призму 3, по возможности совпал с зафиксированным ранее от призмы 3. Аналогичную процедуру проводили и для призм 3, 4. Для этого на ПЗС-матрице пытались совместить положение пучка, прошедшего сквозь призму 2, и пучка, прошедшего тоже сквозь призму 2 и отраженного от призмы 3, 4. Положение первого пучка на ПЗС-матрице вычисляли по положению пучка, прошедшего через призмы 2, 3, с учетом уже известного положения пучка, прошедшего сквозь призму 3. Таким образом, достигалась приблизительная параллельность рабочих граней призм 1—2 и 3—4.

Далее проводили предварительную юстировку ослабителя как целого. Для этого при помощи угловой юстировки ослабителя совмещали на матрице камеры положения пучков, прошедших мимо ослабителя и через призмы 2, 3. Поскольку каждая призма Дове инвертирует угол падения луча, то после такой юстировки падающее излучение становится параллельным наибольшим граням призм 2, 3. После проведения процедуры юстировки ослабителя необходимо было зафиксировать на матрице положение пучка, прошедшего через призмы 2, 3. В дальнейшем данное положение использовали для упрощенной юстировки ослабителя.

Большинство фотоприемников из-за ограниченности динамического диапазона не могут измерять K порядка 10^{-6} . При использовании четырехпризменного ослабителя становится возможным определять K промежуточного луча, проходящего через призму 3 (см. рис. 1, б). В таком луче для вертикальной поляризации $K = 10^{-2}$, а для горизонтальной $K = 10^{-4}$. У попарно параллельной конфигурации призм этот луч параллелен входящим и выходящим лучам ослабителя, что очень удобно для контроля K .

Экспериментальные исследования. Для реализации предложенной конфигурации ослабителя была собрана экспериментальная установка, аналогичная используемой в [1]. На исследуемый ослабитель падало лазерное излучение с длиной волны 532 нм, прошедшее через поляризующую систему. Выходящее из ослабителя излучение попадало либо в измерительный приемник, либо на ПЗС-камеру с

объективом 135 мм для юстировки конструкции. Во избежание паразитной засветки ослабитель располагали между диафрагмами, некоторые его элементы закрывали черной бумагой, а всю экспериментальную установку помещали в зачерненный короб.

Ослабитель размещали на комбинированном поворотном столике, состоящем из двух наногониометров Standa 8MG99, обеспечивающих вращение вокруг осей X , Y в пределах $\pm 2,5^\circ$. Погрешность шага при повороте вокруг оси X составляла $16''$ и $11''$ вокруг оси Y .

Вначале за стойкой с ослабителем устанавливали предварительно настроенную камеру. Для корректности измерения углов распространения излучения камеру юстировали так, чтобы она могла фиксировать пучки излучения, падающего на ослабитель (при параллельном сдвиге ослабителя), выходящего из призмы 3 и отраженного от призмы 4. После чего подбирали призмы ослабителя и предварительно юстировали его по методу, описанному выше. Установкой специальных подкладок под призму 1 достигалась параллельность между рабочими гранями призм 1, 2 с погрешностью порядка $30''$. Аналогично установкой прокладок под призму 4 добивались параллельности рабочих граней призм 3, 4 с той же погрешностью. После юстировки отдельных призм их положение фиксировали несколькими каплями клея.

Во второй части эксперимента измеряли угловые зависимости K для определения внутренних параметров ослабителя. Вначале при помощи поляризатора выставляли вертикальную поляризацию падающего на ослабитель излучения. Это достигалось путем измерения мощности излучения, проходящего призму 3, в зависимости от угла поворота поляризатора. Максимальному значению мощности соответствовала вертикальная поляризация падающего на первую призму излучения.

На входе ослабителя устанавливали мощность излучения 200 мВт, которую ослабляли светофильтром приблизительно в 1000 раз для того, чтобы результирующая мощность излучения оказалась в динамическом диапазоне приемника. Исследуемая конструкция позволяла ослаблять падающее лазерное излучение на шесть порядков. Для измерений мощности излучения в столь широком диапазоне, как уже упоминалось выше, использовали особенность призм Дове — пропускать сквозь призму часть падающего на рабочую грань излучения.

При помощи измерительного преобразователя измеряли мощность излучения на входе ослабителя и промежуточного луча, выходящего из призмы 3 ослабителя. После этого удаляли светофильтр на входе ослабителя и повторяли измерения мощности промежуточного луча, а также излучения на выходе ослабителя. Полученных данных было достаточно для вычисления K для установленной поляризации. Далее измеряли угловые зависимости K падающего излучения при повороте ослабителя вокруг горизонтальной оси в пределах $220'$. Следует отметить, что для данной конфигурации призм не было необходимости юстировки приемника перед каждым измерением следующей точки угловой зависимости, поскольку ослабитель не смещал положения выходного пучка. Для двухпризменного ослабителя такая юстировка является обязательной, т. к. без нее невозможно корректно измерять угловые зависимости.

Затем плоскость поляризации падающего излучения изменяли на 90° и повторно измеряли угловые зависимости K . Полученные в результате данной процедуры зависимости

отмечены точками на рис. 3. Результаты измерений показали, что после предварительной юстировки ослабителя коэффициент поляризации [5] ослабленного излучения при циркулярной поляризации падающего излучения составил порядка 5,2 %.

Для осуществления окончательной юстировки необходимо определить неизвестные внутренние параметры построенного ослабителя. Искомые параметры находили путем аппроксимации измеренных угловых зависимостей теоретической моделью, описанной выше, при помощи метода наименьших квадратов (см. рис. 3). Таким образом, вычисляли неизвестные параметры конфигурации ослабителя, а именно: основные углы γ_1, γ_2 пар призм (1—2 и 3—4 на рис. 1, б) относительно оптической оси; углы скоса δ_1, δ_2 для тех же пар призм. Значение СКО между экспериментальными точками и соответствующими точками аппроксимирующих кривых составило 0,17 %.

Найденные параметры использовали в математической модели ослабителя, проводили минимизацию степени поляризации ослабленного излучения путем изменения углов α_X, α_Y . Таким образом определяли углы юстировки гониометрических столиков, необходимые для уменьшения зависимости K от поляризации. В данной работе установлено, что при дополнительном повороте столиков соответственно на $20'$ вокруг вертикальной и $28'$ вокруг горизонтальной осей изменение поляризации ослабляемого излучения становится минимальным. Экспериментальная проверка показала, что значение степени поляризации η при рассчитанных углах юстировки составило около 0,5 %. При этом $K = 7,15 \cdot 10^{-7}$, что не совпадает с теоретическим значением $7,75 \cdot 10^{-7}$ для идеальной конструкции. Такую разницу можно объяснить отличием значения двугранного угла между отражающими гранями призм 1—2 и 3—4 от идеального, т. е. $\approx 60^\circ 29'$ вместо 60° . Угол падения излучения на каждую призму составил $45^\circ 25'$ вместо 45° .

Погрешности определения величин K и η , обусловленные остаточной непараллельностью рабочих граней призм порядка $30''$ и неточностью определения неизвестных параметров системы при обработке экспериментальных данных (см. рис. 3), в относительных единицах составили 0,19 % и 1,76 %, соответственно.

Описанную процедуру юстировки ослабителя с использованием его угловых зависимостей необходимо проводить только для вновь изготовленного ослабителя. При повторной юстировке ослабителя достаточно провести только предварительную настройку путем совмещения положения на ПЗС-матрице падающего на ослабитель пучка и пучка, прошедшего через призмы 2, 3. После чего ослабитель необходимо повернуть на известные углы, определенные ранее в процессе дополнительной юстировки.

Выводы. Четырехпризменный ослабитель с сонаправленным расположением призм наиболее предпочтителен по сравнению с двумя каскадами двухпризменного, поскольку существенно упрощается его юстировка и сборка, а также обеспечивается компактность конструкции. Наиболее удачной является попарно параллельная четырехпризменная конфигурация ослабителя, так как она в отличие от попарно перпендикулярной обеспечивает преимуществом четырех- и двухпризменной моделей, сохраняет направление распространения луча, позволяет подобрать призмы, обеспечивающие почти идеальную работу ослабителя, и в этом случае промежуточный луч расположен наиболее удобно для конт-

роля поляризации падающего излучения и коэффициента его ослабления.

Экспериментальные исследования полностью подтвердили выводы теоретического анализа четырехпризменных конфигураций ослабителя излучения, а также корректность разработанной математической модели.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о возможности построить восьмипризменный ослабитель для $K \approx 10^{-12}$ из двух зеркально симметричных четырехпризменных попарно параллельных каскадов, расположенных на одной платформе. При этом необходимо сохранить возможность юстировки каждой пары призм в отдельности. В данном случае отдельная юстировка каждого из каскадов является правомочной, поскольку каждый из них сохраняет направление распространения исходного излучения. При этом для отдельных частей сохранены все достоинства попарно параллельной конфигурации четырехпризменного ослабителя и благодаря зеркальной симметричности каскадов до-

стигнута слабая чувствительность коэффициента ослабления всей системы к ее юстировке.

Л и т е р а т у р а

1. Ковалев А. А. и др. Калиброванный френелевский ступенчатый ослабитель мощности лазерного излучения // Измерительная техника. 2012. № 2. С. 17—21; Kovalev A. A. et al. Calibrated Fresnel stepwise attenuator of laser radiation power // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 2. P. 130—136.

2. Родионов С. А. Основы оптики. СПб: Изд-во СПб. техн. ун-та, 2000.

3. Лурье А. И. Аналитическая механика. М: Физматлит, 1961.

4. Ландау Л. В., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

Дата принятия 01.10.2013 г.

535.417:53.082.54

Влияние фокусировки на латеральное разрешение интерференционного микроскопа

Г. Г. ЛЕВИН, Н. Н. МОИСЕЕВ, Я. А. ИЛЮШИН, В. Л. МИНАЕВ

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

Проанализирована зависимость латерального разрешения интерференционного микроскопа от расстояния между фазовой ступенькой и плоскостью фокуса объектива предметного канала микроскопа. Проведено сравнение результатов измерений на нескольких длинах волн, полученных методом численного моделирования в широком диапазоне высот фазовой ступеньки и путем обработки реальных фазовых изображений.

Ключевые слова: интерференционный микроскоп, латеральное разрешение, фазовая ступенька, метод конечных разностей во времени.

The studies were carried out at several wavelengths by numerical simulations in the wide range of the phase step heights, as well as by processing the real phase images obtained.

Key words: interference microscope, lateral resolution, phase step, finite difference in time domain method.

В [1] приведены результаты измерений латерального разрешения интерференционного микроскопа для разных длин волн оптического излучения и высоты прямоугольной фазовой ступеньки, показавшие зависимость этих результатов от соотношения между длиной волны и высотой ступеньки и возможность получения латерального разрешения, существенно превосходящего дифракционный предел Аббе.

Фазовый объект в виде прямоугольной ступеньки образован двумя параллельными плоскостями, сдвинутыми по высоте на величину h и имеющими одинаковый коэффициент отражения. Объекты такого типа характерны для микроэлектромеханических систем и микроэлектроники в целом. Для получения максимального разрешения необходимо выполнить точную фокусировку. Однако при работе с фазо-

выми объектами в виде ступеньки надо учитывать, что обе плоскости не могут быть одновременно в фокусе. Либо одна, либо другая, или обе плоскости находятся вне фокуса, а при увеличении высоты ступеньки до значений, превышающих глубину резкости R_z , изображение одной из плоскостей размывается и может вообще исчезнуть.

Глубина резкости определяется по размеру пятна Эйри и рассчитывается по формуле

$$R_z = 2\lambda/(NA)^2, \quad (1)$$

где λ — длина волны оптического излучения, NA — числовая апертура. При увеличении NA значение R_z уменьшается, а аксиальная разрешающая способность микроскопа повышается. Для максимальных значений NA иммерсионных