

УДК 535.4 : 521.317

МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ НА КРУГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗАПИСЫВАЮЩИХ СИСТЕМАХ

© Р. В. Шиманский

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: shimansky@iae.nsk.su*

Разработан и исследован метод контроля точности изготовления прецизионных синтезированных структур на круговых лазерных записывающих системах с использованием специализированных микроструктур, формируемых по двум ортогональным направлениям. Данные микроструктуры состоят из двух частей, одна из которых формируется перед записью прецизионной структуры, а вторая — во время записи структуры. Сдвиг между первой и второй частью микроструктуры позволяет определить ошибки дрейфа, сдвига подложки и другие по каждой из координат. Метод даёт возможность повысить точность и достоверность сертификации изготовления прецизионных синтезированных структур.

Ключевые слова: метод контроля точности, прецизионные синтезированные структуры, круговая лазерная записывающая система, радиальная координата, координатные метки.

DOI: 10.15372/AUT20190313

Введение. Контроль точности изготовления прецизионных синтезированных структур или дифракционных оптических элементов (ДОЭ) является актуальной задачей особенно для их применения при интерферометрических измерениях асферических волновых фронтов. Погрешности изготовления прецизионных структур влияют на точность и достоверность результатов измерения, так как ошибки записи и воздействие внешних факторов на систему позиционирования (температурный дрейф, изменение атмосферного давления), возникающие в процессе изготовления структуры ДОЭ, приводят к появлению погрешностей волнового фронта, формируемого этим элементом. Контроль погрешностей позволяет определить качество изготовленного ДОЭ и оценить точность формируемого им волнового фронта, что даёт возможность существенно улучшить достоверность последующего измерения формы поверхности асферической оптики.

Эти погрешности W могут быть определены (в долях длины волны света) как

$$W = m\lambda s_i/T, \quad (1)$$

где m — порядок дифракции; T — период дифракционной структуры в данной области ДОЭ; s_i — погрешность координаты записи (область с координатами r_i, φ_i) в направлении, перпендикулярном зонам ДОЭ [1].

В Институте автоматики и электрометрии СО РАН создана прецизионная круговая лазерная записывающая система (КЛЗС) CLWS300IAE, оптимизированная для записи таких элементов [2]. Несмотря на высокую скорость сканирования в КЛЗС, время записи ДОЭ больших размеров может достигать 10 часов и более. В течение этого времени абсолютная погрешность позиционирования записывающего пучка по всему полю ДОЭ не должна превышать 10 нм. Для выявления ошибок, возникающих в процессе записи, таких как дрейф системы радиального позиционирования относительно центра вращения

шпинделя, сдвиг подложки на планшайбе шпинделя и других, был предложен метод сертификации процесса записи [3, 4], основанный на записи небольших микроструктур, состоящих из специальных решёток. Этот метод хорошо зарекомендовал себя, однако имеет ограниченную точность и даёт возможность контролировать погрешность записи только по радиальной (X) координате.

Цель данного исследования — представить результаты разработки нового метода [5] контроля точности изготовления прецизионных оптических голограмм по взаимному смещению специальных микроструктур, записываемых одновременно с элементом. Метод позволяет определять погрешности записи как по радиальной координате, так и в перпендикулярном ей направлении при изготовлении ДОЭ в полярной системе координат, а также существенно увеличить точность измерения погрешности изготовления прецизионных синтезируемых голограмм.

Погрешности изготовления прецизионных ДОЭ. Структура ДОЭ производится методом прямой лазерной записи на вращающейся оптической заготовке, покрытой плёнкой хрома, и представляет собой набор элементарных ячеек с адресацией в полярной системе координат. Под воздействием лазерного излучения экспонируемые ячейки, перекрываясь, образуют картину полос или дифракционных зон. Адрес записи произвольной ячейки i в полярной системе координат определяется как $P_i(r_i, \varphi_i)$, где r_i и φ_i — радиальная и угловая координаты записи. Координата φ_i находится как разность между началом угловой координаты ($\varphi = 0$) и текущим угловым положением вращающейся оптической заготовки. Величина r_i отсчитывается от начала полярной системы координат ($r_0 = 0$), которой является точка совмещения оси вращения оптической заготовки с центром записывающего сфокусированного пучка лазерного излучения. Процесс записи вносит погрешности в структуру ДОЭ. Погрешность изготовления — это расстояние между расчётной P_i и записанной P'_i координатами точек. Величина абсолютной погрешности координаты записи находится как $\varepsilon_i = P_i - P'_i$. Контроль данной погрешности записи ДОЭ — одна из важнейших частей процесса изготовления прецизионных синтезированных голограмм.

Метод контроля погрешности изготовления структуры дифракционных оптических элементов. Контроль и оценка погрешности ДОЭ после завершения процесса его изготовления позволяют определить качество и точность изготовленного элемента и провести его сертификацию. Для осуществления контроля по двум координатам предложено сформировать специальные микроструктуры (координатные метки) [5] в виде решёток с периодом 2–3 мкм. Данные метки записываются на заготовке по той же технологии и в то же самое время, что и сам ДОЭ, в специальных областях размерами 100×200 мкм с заданными интервалами по радиальному направлению. После завершения записи и получения структуры ДОЭ (например, травлением хрома) производится фотографирование координатных меток с использованием цифрового микроскопа с последующей цифровой обработкой и измерением их характеристик. Пример расположения микроструктур на оптической заготовке приведён на рис. 1. Каждая координатная метка состоит из двух групп периодических решёток. Внутренняя часть каждой метки формируется перед записью ДОЭ, а вторая часть — в процессе записи структуры элемента. Метки формируются в небольших областях непосредственно в рабочем поле ДОЭ. Так как размеры областей небольшие, то их влияние на эффективность по всей рабочей площади ДОЭ ничтожно.

Предложенный метод основан на том, что внутренняя часть меток записывается за короткий промежуток времени, и это фактически гарантирует отсутствие координатных погрешностей при их формировании, а внешняя часть меток — во время записи ДОЭ в течение нескольких часов. Соответственно данные структуры будут формироваться уже под влиянием накопленных погрешностей системы позиционирования лазерного пучка. По завершении изготовления ДОЭ сдвиг между первой и второй частью координатных меток позволяет определить ошибку дрейфа, сдвига подложки и других по каждой из координат

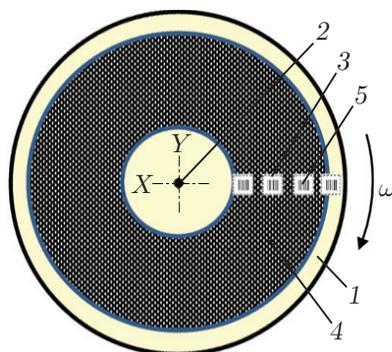


Рис. 1. Схема расположения координатных меток: 1 — оптическая заготовка, 2 — ось вращения оптической заготовки, 3 — контрольное окно, 4 — дифракционная структура, 5 — координатная метка

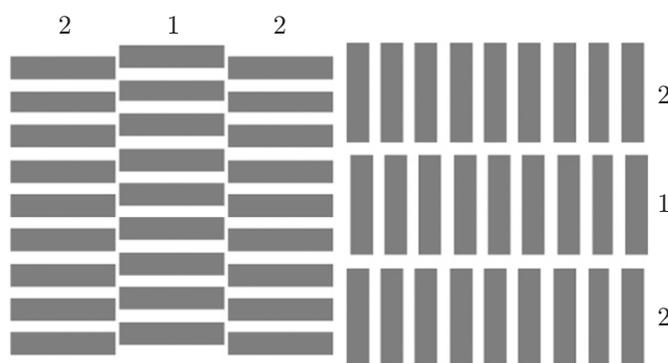


Рис. 2. Двухкоординатная метка с двумя группами периодических решёток: 1 — внутренняя группа периодических решёток, формируемая перед записью ДОЭ, 2 — внешняя группа, формируемая во время записи

и на каждом радиусе, где были сформированы метки. Чтобы найти погрешность одновременно по координате X (радиальной) и по координате Y , метки наносятся попарно, а направления штрихов периодических решёток в них ортогональны. На рис. 2 схематично изображена пара координатных меток (далее двухкоординатная метка).

Размер внутренней группы периодических решёток выбирается таким образом, чтобы время их записи было небольшим и за это время дрейф и ошибки системы позиционирования записывающего лазерного пучка заведомо отсутствовали или были ничтожно малы. Например, если размер координатной метки составляет $h = 30 \times 100$ мкм, то при скорости вращения оптической заготовки $n = 20$ об./с и шаге перемещения записывающего лазерного пучка $s = 0,5$ мкм время нанесения координатной метки составит около $t_1 = 5$ с, а всей линейки, например из 10 координатных меток, — около $t_2 = 60-70$ с с учётом времени на перемещение и позиционирование лазерного пучка на заданных радиусах. При характерной величине температурного дрейфа устройства лазерной записи (около 1 мкм за 2,5 часа работы) величина дрейфа за время t_2 нанесения линейки будет менее 5–6 нм, что много меньше шага перемещения s , используемого при записи ДОЭ, т. е. можно считать, что внутренняя часть периодических решёток в координатных метках нанесена без погрешностей.

Внешняя группа периодических решёток формируется во время записи структуры ДОЭ в свободном пространстве окна координатной метки при достижении очередного радиуса, на котором уже записана её внутренняя часть.

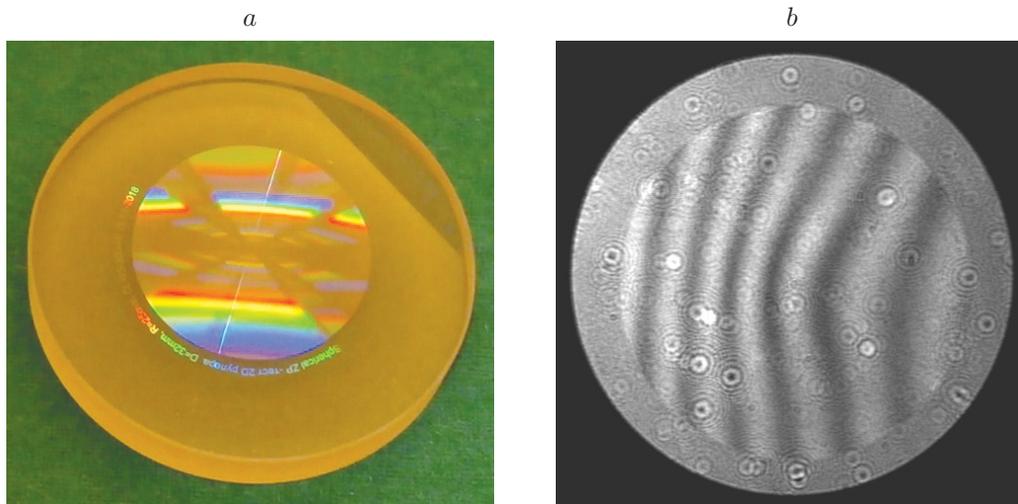


Рис. 3. Экспериментальный ДОЭ с двухкоординатными метками: *a* — фотография тестового ДОЭ диаметром 32 мм со сферическим волновым фронтом радиусом 25 мм; *b* — интерферограмма тестового ДОЭ

Следовательно, предложенный метод позволяет определить погрешности изготовленного ДОЭ по обеим координатам на всех радиусах, где были сформированы двухкоординатные метки. Так как метки являются неотъемлемой частью полученной структуры, то их анализ и обработку можно производить разными методами в любое время после завершения изготовления ДОЭ, что также даёт возможность увеличить достоверность оценки погрешности записи.

Экспериментальная запись ДОЭ с использованием двухкоординатных меток. Сложность записи двухкоординатных меток обусловлена малым периодом решётки (2 мкм), особенностью формирования структуры в сканирующих системах, особенностью подбора мощности записи и её диапазоном для круговых лазерных записывающих систем. Для определения наилучших параметров формирования меток и отладки алгоритма их записи проведён ряд предварительных тестовых записей серий координатных меток на разных радиусах, с разными параметрами шага записи, параметрами мощности, количеством проходов и т. д.

С учётом тестовых записей была проведена экспериментальная запись ДОЭ с использованием двухкоординатных меток. Экспериментальный ДОЭ является зонной пластиной диаметром 32 мм со сферическим фронтом радиусом 25 мм. Структура ДОЭ изготавливалась на CLWS300IAE методом прямой лазерной записи на вращающейся оптической заготовке из ситалла, покрытой плёнкой хрома.

Запись производилась от максимального радиуса к центру вращения заготовки. Перед изготовлением элемента было выполнено прецизионное совмещение записывающего пучка с осью вращения оптической заготовки по специально сформированной тестовой окружности микронного радиуса [6]. В процессе записи регулярно измерялся уход центра на радиусах формирования координатных меток. Для периодического измерения ухода центра запись ДОЭ временно приостанавливалась, лазерный пучок перемещался в центр вращения заготовки, сканировалась тестовая окружность и определялся текущий уход центра [6, 7]. После этого процесс записи ДОЭ автоматически продолжался. Полученные значения уходов центра записывались в специальный файл и применялись в дальнейшем для сравнительного анализа результатов обработки координатных меток.

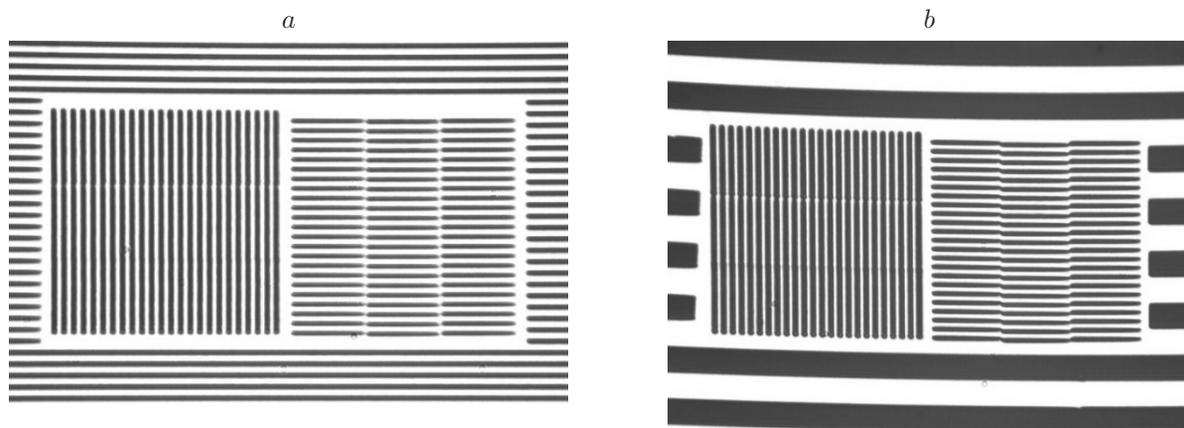


Рис. 4. Фотографии двухкоординатных меток экспериментальной записи:
a — на радиусе 11 мм, *b* — на радиусе 2 мм

На рис. 3 представлена фотография изготовленного экспериментального ДОЭ с двухкоординатными метками и его интерферограмма, на которой видна погрешность волнового фронта, возникающая из-за ошибки записи по радиальной координате. Время записи ДОЭ составило примерно 2 часа.

На рис. 4 показаны фотографии двухкоординатных меток, сделанные на микроскопе с $100\times$ увеличением. На рис. 4, *b* на правой координатной метке, которая регистрирует погрешность записи по радиальной координате, хорошо видно смещение внутренней группы периодических решёток относительно внешних в отличие от соответствующей координатной метки на радиусе 11 мм. Смещение структур является результатом дрейфа радиальной координаты CLWS300IAE за 2 часа записи, а её величина — характерной для данной системы. Так как при экспериментальной записи производился только регулярный поиск ухода центра, а режим динамической коррекции координаты лазерного пучка по радиальной координате был выключен [7], данная погрешность стала наблюдаться визуально. При штатных записях прецизионных дифракционных структур режим динамической коррекции включён, но без специальной обработки полученных изображений координатных меток найти погрешность с необходимой точностью не представляется возможным.

Определение величины погрешности изготовления ДОЭ. Погрешность изготовления ДОЭ рассчитывают по двум направлениям (W_x и W_y): в каждой координатной метке определялась по взаимному смещению первой (внутренней) группы периодических решёток относительно второй (внешней) группы периодических решёток по формулам

$$W_x = m\lambda s_x/T_x, \quad W_y = m\lambda s_y/T_y. \quad (2)$$

Для точного измерения смещения штрихов решёток предложено применить метод обработки интерферограмм. Тогда группы периодических решёток в координатных метках представляются как интерферограммы, где изображения штрихов могут быть сформированы в виде интерференционных полос. Смещение S_x и S_y двух групп периодических решёток в каждой паре координатных меток определяют по их сглаженным изображениям методом расшифровки интерферограмм [8]. На рис. 5 приведён пример обработки и трекинга полос решётки исходного изображения одной контрольной метки, на основе которых рассчитывается полутоновая карта фазового сдвига полос. Величина смещения определяется по графику как $S = 0,4T$. В данном примере при $T = 3$ мкм смещение, обусловленное погрешностью изготовления ДОЭ, составляет 1,2 мкм. Для уменьшения погрешности измерения и устранения случайных шумов проводится усреднение полутоновой карты по нескольким сечениям.

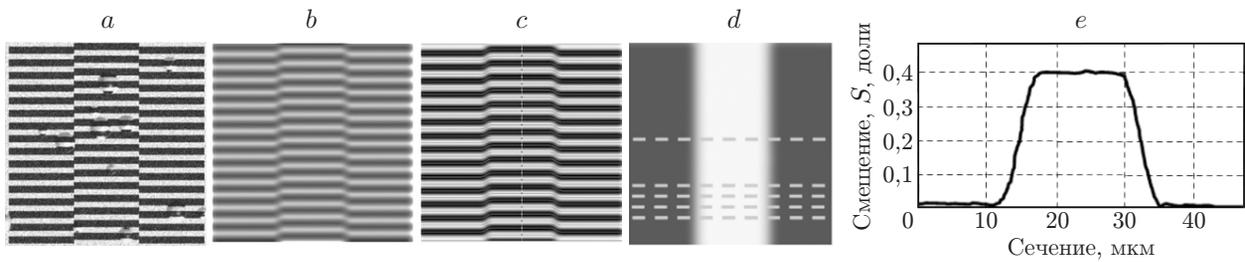


Рис. 5. Пример обработки координатной метки: *a* — исходная фотография, *b* — сглаживание, *c* — трекинг полос, *d* — полутоновая карта фазового сдвига (пунктирными линиями обозначено несколько сечений), *e* — профиль фазового сдвига, рассчитанный как усреднённое значение сечений полутоновой карты

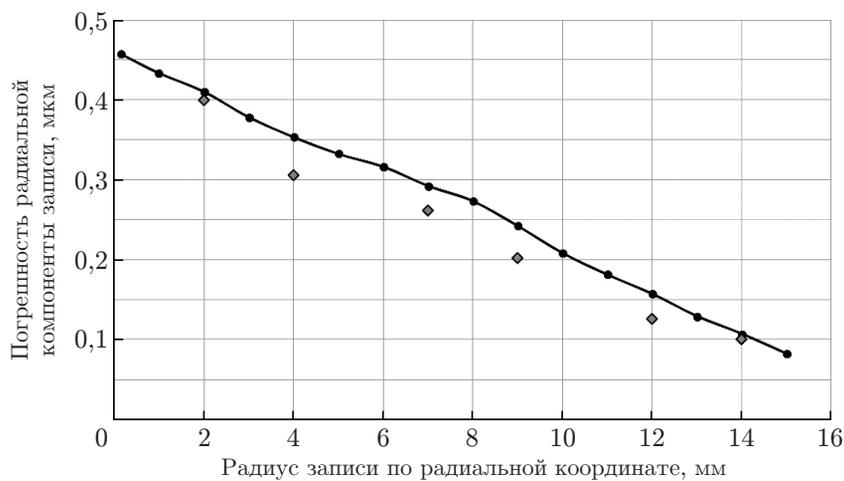


Рис. 6. Диаграмма ухода центра по радиальной координате (кривая линия с точками) и результаты оценки погрешности радиальной координаты записи предложенным методом (ромбы)

Результаты определения погрешности по радиальной координате записанного экспериментального ДОЭ. С помощью предложенного метода была дана оценка погрешности координаты записи по радиальной координате экспериментального ДОЭ. На рис. 6 приведена диаграмма сравнения результатов периодического поиска центра [6, 7] в процессе записи ДОЭ (кривая линия с точками) и результаты расчёта ошибки предложенным методом (ромбы) по двухкоординатным меткам. Среднеквадратичное отклонение расчёта ошибки записи по радиальной координате между двумя методами в каждой точке измерения не превышает 10 нм, что соответствует поставленной задаче для оценки величины погрешности записи ДОЭ.

Заключение. Разработан и исследован новый метод контроля погрешности записи структуры ДОЭ в полярной системе координат с использованием двухкоординатных меток в виде линейных решёток, ориентированных по двум ортогональным осям. Внутренняя часть каждой метки формируется перед записью ДОЭ, а вторая часть — во время записи структуры ДОЭ. Метки образуются в небольших областях непосредственно в рабочем поле ДОЭ. Сдвиг между первой и второй частью метки даёт возможность определить ошибку дрейфа, сдвига подложки и т. д. по каждой из координат. Для проверки метода была произведена экспериментальная запись ДОЭ с использованием двухкоординатных меток. Экспериментальный ДОЭ является зонной пластиной диаметром 32 мм со сфери-

ческим фронтом радиусом 25 мм. Структура ДОО изготавливалась на CLWS300IAE методом прямой лазерной записи на вращающейся оптической заготовке из ситалла, покрытой плёнкой хрома. Результаты эксперимента показали, что предложенный метод позволяет определять погрешности записи с ошибкой не более 10 нм, это примерно на порядок лучше, чем можно получить при использовании стандартного метода. Более того, описанный метод позволяет одновременно определять погрешность по двум ортогональным осям. Метод даёт возможность повысить точность и достоверность сертификации ошибок изготовления ДОО, предназначенных для контроля формы асферической оптики, в том числе внесевых сегментов, цилиндров, торических линз, поверхностей свободной формы и т. п.

Благодарности. Выражаем благодарность д-ру техн. наук В. П. Королькову и канд. техн. наук Р. К. Насырову за консультации по вопросам технологии лазерной записи и оптических систем, а также ведущему инженеру-оптику А. Р. Саметову и ведущему инженеру-технологу А. И. Малышеву за подготовку и выполнение записей тестовых и экспериментальных ДОО на CLWS300IAE. В исследованиях использовано оборудование Центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117052210002-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang Yu-C., Burge J. H. Error analysis for CGH optical testing // Proc. SPIE. 1999. **3782**. P. 358–366.
2. Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // Appl. Opt. 1999. **38**, N 8. P. 1295–1301.
3. Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Cherkashin V. V., Burge J. Methods for certification of CGH fabrication // Proc. of the Conf. «Diffractive Optics and Micro-Optics». Tucson, USA, 3–6 June, 2002. DMD6.
4. Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2002. **38**, № 3. С. 3–19.
5. Пат. 2587528 РФ. Способ контроля погрешности изготовления дифракционных оптических элементов (ДОО) /А. Г. Полещук, Р. В. Шиманский. Оpubл. 20.06.2016, Бюл. № 17.
6. Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. Совмещение записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры при синтезе дифракционных оптических элементов в полярной системе координат // Автометрия. 2017. **53**, № 2. С. 30–38.
7. Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. Динамическая коррекция координаты лазерного пучка при записи крупногабаритных дифракционных элементов для контроля асферических зеркал // Автометрия. 2017. **53**, № 3. С. 64–73.
8. Максимов В. Г., Чудинов С. А., Насыров Р. К., Маточкин А. Е. Расчетный модуль для анализа волновых фронтов // Изв. вузов. Физика. 2013. **56**, № 9–2. С. 212–214.

Поступила в редакцию 09.04.2019

После доработки 26.04.2019

Принята к публикации 13.05.2019