

УДК 681.787 + 535.417

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ВРАЩЕНИЕМ ДВУХЛУЧЕВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА С НЕПОДВИЖНЫМ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

В. Д. Угожаев

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

Представлены результаты расчёта предельных характеристик двухлучевого интерферометра на основе светоделительного кубика с неподвижными зеркалами и неподвижным фоточувствительным элементом, в котором перестройка угла схождения выполняется только путём вращения источника света относительно интерферометра. Показано, что угол схождения можно перестраивать в диапазоне $46\text{--}166^\circ$ при достаточно широких световых пучках.

Ключевые слова: двухлучевой интерферометр, светоделительный кубик, неподвижные зеркала, неподвижный фоточувствительный элемент, вращательная перестройка угла схождения, многомерная периодическая структура.

DOI: 10.15372/AUT20160414

Введение. Для создания периодических структур с различной метрикой и пространственными частотами от единиц до 10^4 мм^{-1} широко используются двухлучевые интерферометры, в которых два идентичных световых пучка (далее парциальные пучки) пересекаются под требуемым углом схождения, определяющим период записываемой структуры. В типичных вариантах оптических схем [1, 2] источник коллимированного светового пучка (далее исходный пучок) и сам интерферометр неподвижны, поэтому изменение угла схождения в нём достигается юстировкой зеркал, которые направляют парциальные пучки на фоточувствительный элемент (ФЧЭ). Кроме того, понадобится выравнять длины плеч, особенно в случае широкополосного излучения, при каждой переустановке угла схождения. В итоге при проведении перестроечных работ необходимо выполнить ряд юстировочных и измерительных операций. Эти операции исключаются, если применяется вращательная перестройка угла схождения, которая была предложена и проанализирована в [3–5]. Возможны два эквивалентных способа осуществления такого движения: интерферометр как целое вращается относительно неподвижного источника исходного пучка либо источник — относительно неподвижного интерферометра. Ось вращения должна быть перпендикулярна плоскости падения пучка на светоделительную поверхность. Зеркальная симметрия таких конфигураций относительно этой поверхности обеспечивает нулевую разность хода по осям парциальных пучков при любом угле схождения, благодаря чему требования к временной когерентности оказываются минимальными. Вращательная перестройка непрерывна и может реализовываться в предельно широком диапазоне (от 0 до 180°) [4, 5]. Такой способ перестройки позволяет существенно упростить эксплуатацию прибора.

В рассмотренных конфигурациях [3–5] положение оси вращения не определено, поэтому помимо вращения понадобится хотя бы ещё одно линейное перемещение, например, для согласования положения исходного пучка на входе в интерферометр с требуемым углом схождения в случае неподвижного ФЧЭ.

Можно отказаться от линейного перемещения, если выбрать нужное положение оси вращения. Такая задача решена в работе [6], где рассматривается двухлучевой интерферометр на основе светоделительного кубика (СДК) с неподвижными зеркалами (ДИНЗ) и неподвижным фоточувствительным элементом (НФЧЭ). Его ось вращения расположена в плоскости светоделительной поверхности за НФЧЭ по ходу парциальных пучков. В [6] получены и проанализированы зависимости диапазона перестройки угла схождения и диаметра исходного пучка от соотношения геометрических параметров ДИНЗ с НФЧЭ.

В данной работе представлены предельные характеристики такого интерферометра, которые были рассчитаны в целях увеличения более чем вдвое полного диапазона перестройки периода интерференционной картины (ИК) в одном устройстве путём суммирования нескольких поддиапазонов, что может сделать интерферометр универсальнее и расширить область его применения.

Оптическая схема ДИНЗ с НФЧЭ (рис. 1) взята из [6] с тем отличием, что добавлено положение оси вращения Z , ход световых пучков отображается их осевыми лучами. Исходный пучок 1 входит в СДК 3 через поверхность C_1C_4 под углом падения θ на расстоянии Q от ребра C_1 ; плоскость падения перпендикулярна рёбрам C_1-C_4 и совпадает с плоскостью рисунка. Ось вращения Z перпендикулярна этой плоскости. Парциальные пучки 2.1 и 2.2 , созданные на светоделительной поверхности C_1C_2 , выходят из СДК на равных расстояниях B от ребра C_2 и после отражения от неподвижных зеркал 4.1 и 4.2 направляются друг к другу под углом схождения 2α , образуя в области взаимного перекрытия интерференционную картину (на рис. 1 не показана) размером S вдоль плоскости симметрии C_1C_2 (далее для удобства будет употребляться понятие «половинный угол схождения» — α). Оси этих пучков пересекаются в точке O на расстоянии L (далее длина схождения). Неподвижный фоточувствительный элемент 5 помещается внутри ИК на расстоянии \tilde{L} ; в общем случае $\tilde{L} \neq L$ и разность $\Delta L = L - \tilde{L}$ определяется как смещение центра ИК (точка O) относительно НФЧЭ. Ось вращения Z расположена на расстоянии

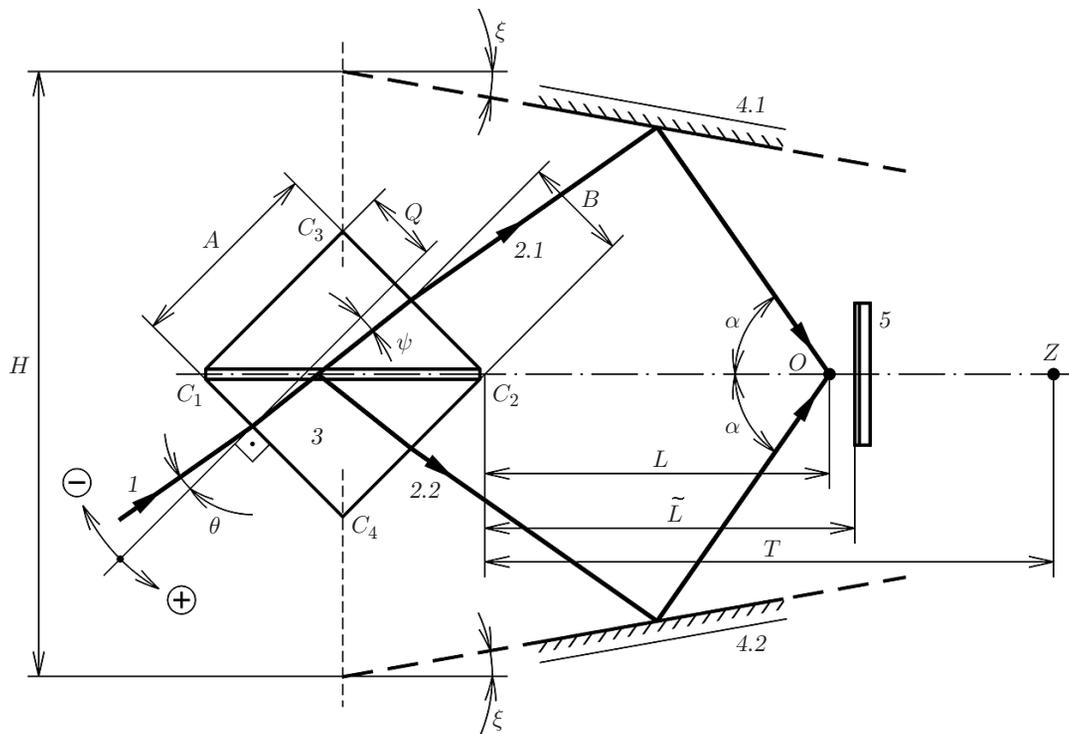


Рис. 1. Оптическая схема ДИНЗ с НФЧЭ

T . Длины L , \tilde{L} и T отсчитываются от ребра C_2 . Зеркала 4.1 и 4.2 размещены симметрично относительно поверхности C_1C_2 и наклонены к ней под равными углами ξ (на рис. 1 $\xi > 0$); расстояние H между зеркалами определяется в плоскости C_3C_4 . Символы «-» и «+» определяют знак угла θ ; принятое правило присвоения знаков удобно тем, что при повороте пучка 1 против часовой стрелки одновременно увеличиваются и угол падения, и половинный угол схождения:

$$\alpha = \theta + 2\xi + 45^\circ. \quad (1)$$

Далее размеры $Q, B, L, \tilde{L}, \Delta L, T, H, S$ и диаметр пучка D используются в безразмерном представлении в единицах длины ребра A СДК: $q, b, l, \tilde{l}, \Delta l, t, h, s$ и d соответственно.

Основные соотношения для расчёта характеристик ДИНЗ с НФЧЭ. При вращении исходного пучка вокруг оси Z длина схождения l изменяется. Смещение Δl удобно выразить через коэффициент смещения k_s как отношение Δl к половине длины s :

$$k_s = 2\Delta l/s = 2\Delta l \sin \alpha/d, \quad (2)$$

согласно очевидному соотношению $s = d/\sin \alpha$. Чтобы ослабление контраста ИК, вызванное таким смещением, было невелико, Δl возьмём существенно меньше s :

$$|k_s| \leq \eta, \quad (3)$$

где $\eta = \text{const} \ll 1$ — допуск значения модуля коэффициента k_s .

В [6] показано, что в ДИНЗ с НФЧЭ с заданными показателем преломления n материала СДК, расстоянием h между неподвижными зеркалами и углом их наклона ξ для любого пучка, характеризуемого половинным углом схождения α_0 и соответствующим углом падения $\theta_0 = \alpha_0 - 2\xi - 45^\circ$ по (1), можно подобрать такое расстояние t , чтобы зависимость $l(\theta)$ имела максимум l_0 при $\theta = \theta_0$. Данный пучок называется опорным. Нижняя ($\theta_1 < \theta_0$) и верхняя ($\theta_2 > \theta_0$) границы зависимости обусловлены касанием исходного или парциальных пучков ближайшего ребра СДК. Связанные с этими границами длины схождения l_1 и l_2 меньше максимальной длины l_0 , т. е. $l_1, l_2 < l_0$. Все длины, а также расстояние t вычисляются по формулам [6], которые здесь для краткости не приводятся. Если НФЧЭ поместить так, чтобы выполнялось условие $l_1, l_2 < \tilde{l} < l_0$, то расстояние \tilde{l} до НФЧЭ можно выразить через указанные длины l_1, l_2, l_0 и допуск η на смещение Δl , используя (2) и (3):

$$\tilde{l} = l_{1,2} + \eta d_{1,2}/2 \sin \alpha_{1,2}; \quad l_0 = \tilde{l} + \eta d_0/2 \sin \alpha_0, \quad (4)$$

где согласно (1) $\alpha_i = \theta_i + 2\xi + 45^\circ$, $i = 0, 1, 2$. Из равенств (4) составляется пара уравнений

$$l_0 - \eta d_0/2 \sin \alpha_0 - (l_{1,2} + \eta d_{1,2}/2 \sin \alpha_{1,2}) = 0 \quad (5)$$

для отыскания граничных значений угла падения; $d_0 = (d_1 + d_2)/2$. При произвольном расстоянии q уравнения (5) удовлетворяются при $d_1 \neq d_2$, поэтому подбор опорного расстояния q_0 вести удобнее, если уравнения представить взаимно независимыми:

$$l_0 - \eta d_{1,2}/2 \sin \alpha_0 - (l_{1,2} + \eta d_{1,2}/2 \sin \alpha_{1,2}) = 0 \quad (6)$$

и добавить к ним ещё одно уравнение

$$d_2 - d_1 = 0. \quad (7)$$

Поскольку расстояние t — функция опорных параметров θ_0 и q_0 , в процессе вычисления θ_1, θ_2, q_0 и d_0 уточняется также и положение оси вращения.

Результаты расчёта характеристик ДИНЗ с НФЧЭ при неизменяемом угле ξ . Итогом решения уравнений (6) и (7) является уникальный набор параметров: $q_0, t, \theta_1, \theta_2, d_0, l$, соответствующий выбранному опорному пучку с углом падения θ_0 , которые определяют конфигурацию и характеристики ДИНЗ с НФЧЭ с заданными значениями n, h, ξ и η . Варьируя значение θ_0 , можно построить зависимости $\alpha_1, \alpha_2, \Delta\alpha(\theta_0)$ (рис. 2, *a*), зависимости $q_0, d_0(\theta_0)$ (рис. 2, *b* из [6]) и $\tilde{l}(\theta_0)$ (рис. 2, *c*). На рис. 2, *a* видно, что ширина $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ диапазона перестройки увеличивается с ростом θ_0 и достигает значения $\Delta\alpha = 24,62^\circ$ ($\alpha_1 = 52,85^\circ; \alpha_2 = 77,47^\circ$). Рис. 2, *b* показывает, что оптимальный диаметр пучка d_0 может достигать уровня $\approx 0,3$. Данный параметр оптимален в том смысле, что при $d < d_0$ нарушается условие (3) вблизи границ и центра диапазона перестройки, а при $d > d_0$ имеет место виньетирование парциальных пучков у границ этого диапазона выходными гранями СДК.

Зависимости $\tilde{l}(\theta_0)$ на рис. 2, *c* монотонно снижаются с ростом θ_0 . Их прерывание справа обусловлено касанием парциальных пучков ребра C_2 СДК (см. рис. 1). Это касание происходит на нижней границе диапазона перестройки, поскольку $l_1 < l_2$ согласно (4)

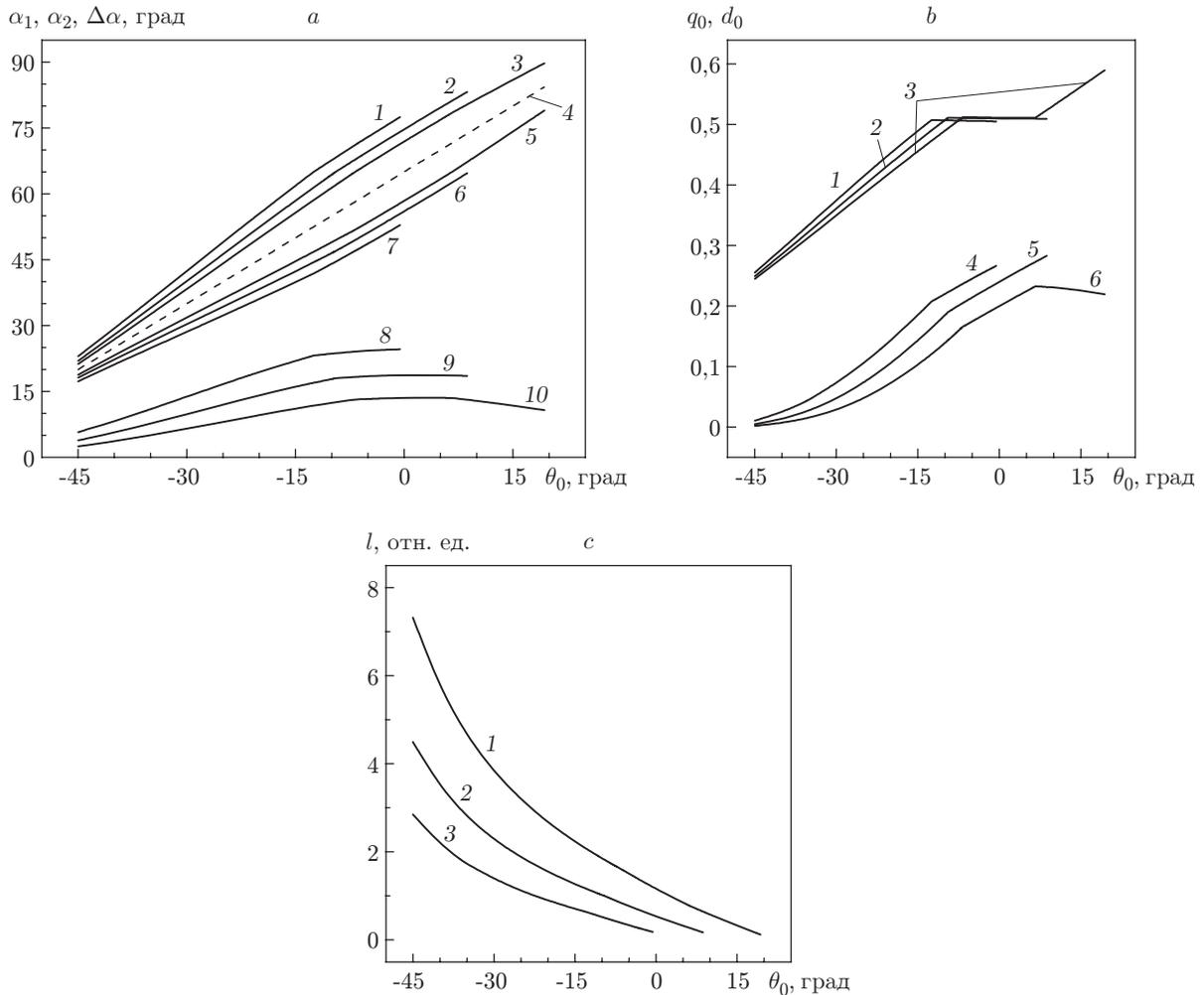


Рис. 2. Характеристики ДИНЗ с НФЧЭ в зависимости от θ_0 при $n = 1,52, \xi = 10^\circ, h = \sqrt{2}, 2, 3$ и $\eta = 0,1$: *a* — верхнее граничное α_2 (кривые 1–3), нижнее граничное α_1 (кривые 7, 6 и 5), опорное α_0 (кривая 4) значения половинного угла схождения и ширина диапазона перестройки $\Delta\alpha$ (кривые 8–10) соответственно; *b* — расстояние q_0 (кривые 1–3) и диаметр d_0 (кривые 4–6); *c* — расстояние l от СДК до НФЧЭ (кривые 3, 2 и 1)

и $\alpha_1 < \alpha_2$ (здесь учтено, что по окончании расчёта $d_1 = d_2 = d_0$). Одновременно границы диапазона перестройки достигают верхних предельных значений $\alpha_{1\text{lim}}$ и $\alpha_{2\text{lim}}$ (см. рис. 2, *a*), а длина схождения — своего минимального значения

$$l_{1\text{min}} = d_0/2 \sin \alpha_{1\text{lim}} \quad (8)$$

по условию упомянутого касания. Из (4) и (8) можно получить ближайшее к СДК положение НФЧЭ:

$$\tilde{l}_{\text{min}} = (1 + \eta)d_0/2 \sin \alpha_{1\text{lim}}. \quad (9)$$

Ширина диапазона перестройки в вышеприведённом примере ($\Delta\alpha = 24,62^\circ$) оказывается чуть больше четверти предельно возможной ширины 90° [4, 5]. Диапазон можно заметно расширить, если «состыковать» ряд поддиапазонов ($\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, j = 1, 2, \dots$), соответствующих разным опорным пучкам с θ_{0j} , выбранным так, чтобы $\alpha_{2j} = \alpha_{1(j+1)}$. Например, для интерферометра с $\xi = 10^\circ$ и $h = \sqrt{2}$ (см. рис. 2, *a*) существуют три поддиапазона: $\theta_{01} = -36,02^\circ$ ($\alpha_{11} = 24,11^\circ, \alpha_{21} = 34,51^\circ, d_{01} = 0,040$); $\theta_{02} = -22,02^\circ$ ($\alpha_{12} = 34,51^\circ, \alpha_{22} = 52,85^\circ, d_{02} = 0,127$) и $\theta_{03} = -0,58^\circ$ ($\alpha_{13} = 52,85^\circ, \alpha_{23} = 77,47^\circ, d_{03} = 0,266$). В итоге ширина составного диапазона $\Delta\alpha_\Sigma$ равна $53,36^\circ$ при разных значениях оптимального диаметра. Очевидно, что подобная стыковка потребует усложнения конструкции прибора, поскольку каждый поддиапазон реализуется в своей конфигурации, определяемой параметрами q_{0j}, t_j, \tilde{l}_j и d_{0j} .

Результаты расчёта предельных характеристик ДИНЗ с НФЧЭ. Построим составной диапазон так, чтобы оптимальный диаметр d_0 не изменялся при переходе от одного поддиапазона к другому. Решение задачи допустимо, если в каждом поддиапазоне будет свой угол ξ_i . В [6] был приведён эскизный вариант диапазона, включающего три поддиапазона с $\xi_{1,2,3} = -10, 0, 10^\circ$ при $h = \sqrt{2}$. Для каждого ξ_j находился такой опорный пучок с углом падения θ_{0j} и соответствующими ему значениями α_{1j} и α_{2j} , для которого $d_0 = 0,25$. По построенным зависимостям $\alpha_1(\xi)$ и $\alpha_2(\xi)$ путём экстраполяции за пределы интервала $\xi = -10 \dots 10^\circ$ была сделана оценка предельно возможной ширины составного диапазона: $\Delta\alpha_\Sigma \cong 60,9^\circ$ ($\alpha_{1\text{min}} \cong 21,6^\circ, \alpha_{2\text{max}} \cong 82,5^\circ$).

В данной работе представлены результаты точного расчёта предельных перестроечных характеристик интерферометра с неподвижными зеркалами и НФЧЭ (рис. 3, *a*). Зависимости $\alpha_{1,2}(\xi)$ и $\theta_0(\xi)$ (кривые 2, 1 и 9 соответственно) построены следующим образом: для каждого значения угла наклона ξ из выбранного ряда были рассчитаны все конфигурационные параметры, включая показанные на рис. 3, *a*, при том же условии $d_0 = 0,25$.

В каждой из этих зависимостей наблюдается наличие двух ветвей: нижней (жирные линии), простирающейся от $\xi = -13,14$ до $\xi = 14,93^\circ$, и верхней (тонкие линии), ограниченной интервалом $\xi = -13,14 \dots -9,98^\circ$. В последнем интервале сосуществуют обе ветви, причём верхней соответствуют большие значения угла θ_0 , что видно по положению на оси ординат нижней и верхней ветвей зависимости $\theta_0(\xi)$ (кривая 9). Для промежуточных значений этого угла в указанном интервале угла ξ оптимальный диаметр $d_0 > 0,25$. Обе ветви соединяются в экстремальной для абсциссы точке $\xi = -13,14^\circ$, что означает наименьший угол наклона неподвижных зеркал, при котором $d_0 = 0,25$. При $\xi < -13,14^\circ$ оптимальны только более узкие пучки. По мере роста угла ξ кривые 2 и 1 прерываются соответственно в точках $E_{\text{up}1}, E_{\text{up}2}$ верхней и $E_{\text{bot}1}, E_{\text{bot}2}$ нижней ветвей, что обусловлено упомянутым выше касанием парциальными пучками ребра C_2 СДК (см. рис. 2, *c*). В этих точках НФЧЭ располагается предельно близко к СДК согласно (9).

Точка X с координатами $\xi = -11,80^\circ$ и $\alpha = 38,72^\circ$ (штриховая линия 4 на рис. 3, *a*) является пересечением нижней ветви кривой 1 с верхней ветвью кривой 2 и соединяет

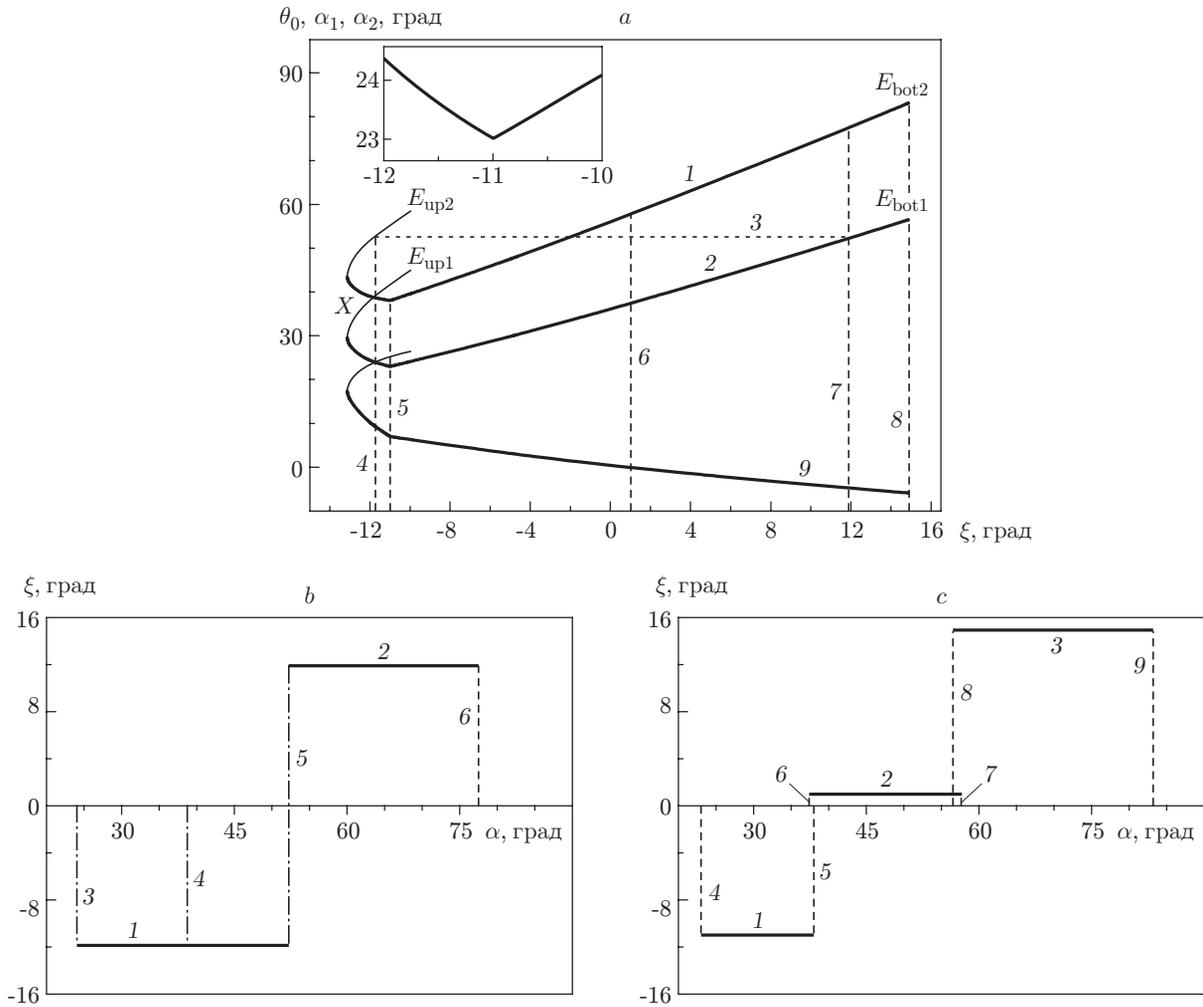


Рис. 3. Предельные характеристики ДИНЗ с НФЧЭ: *a* — нижняя α_1 (кривая 2) и верхняя α_2 (кривая 1) границы диапазона перестройки и опорный угол падения θ_0 (кривая 9) в зависимости от угла ξ при $h = \sqrt{2}$, $\eta = 0,1$ и $d_0 = 0,25$; *b, c* — варианты составного диапазона перестройки угла α

два смежных поддиапазона перестройки в нижней ($\alpha_{11} = 24,03^\circ$, $\alpha_{21} = 38,72^\circ$) и верхней ($\alpha_{12} = 38,72^\circ$, $\alpha_{22} = 52,25^\circ$) ветвях. По уровню, отмеченному пунктирной линией 3, к ним можно присоединить третий поддиапазон с границами $\alpha_{13} = 52,25^\circ$ и $\alpha_{23} = 77,51^\circ$, соответствующими углу $\xi = 11,90^\circ$ (штриховая линия 7). В итоге составной диапазон имеет суммарную ширину $\Delta\alpha_\Sigma = \alpha_{23} - \alpha_{11} = 53,48^\circ$ (рис. 3, *b*).

На нижних ветвях (см. рис. 3, *a*) всех трёх кривых есть излом при $\xi = -10,99^\circ$, обозначенный штриховой линией 5 и в увеличенном масштабе показанный на кривой 2 (см. вставку). На кривых 2 и 1 знак первой производной меняется с «-» на «+», поэтому граничные значения диапазона перестройки минимальны: $\alpha_1 = 23,01^\circ$ и $\alpha_2 = 38,05^\circ$. Данный излом обусловлен переходом угла θ_1 через нуль от положительных значений к отрицательным по мере роста ξ , поскольку при таком переходе граничное касание ребра C_3 заменяется касанием ребра C_1 СДК (см. рис. 1). При смене касания изменяется формула для вычисления диаметра d . Минимумы на кривых 2 и 1 (см. рис. 3, *a*), упомянутые выше, позволяют создать ещё более широкий составной диапазон с $\Delta\alpha_\Sigma = 60,19^\circ$, охватывающий всю доступную в рассматриваемом примере область значений угла α (от $23,01$ до

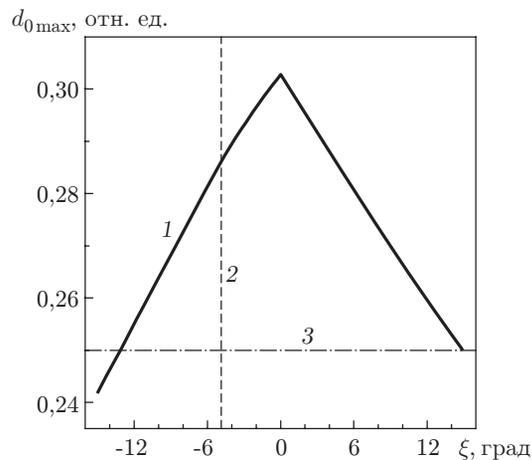


Рис. 4. Зависимость экстремального значения $d_{0\max}$ диаметра пучка от угла ξ при $h = \sqrt{2}$, $\eta = 0,1$ (кривая 1), уровень $\xi = -4,857^\circ$ (прямая 2) и уровень $d_0 = 0,25$ (прямая 3)

$83,20^\circ$). Она заполняет нижнюю ветвь от точки излома на кривой 2 (первый поддиапазон, $\xi_1 = -10,99^\circ$) до точки $E_{\text{bot}2}$ на кривой 1 (третий поддиапазон, $\xi_3 = 14,93^\circ$) и включает промежуточный поддиапазон ($\xi_2 = 1^\circ$) — точки обозначены штриховыми линиями 5, 8 и 6 соответственно. Диапазон, показанный на рис. 3, с, почти совпадает с предсказанным в [6]: уже (на $0,7^\circ$) и располагается выше (на $0,7^\circ$). Поддиапазоны в нём слегка перекрываются, что представляется более удобным по сравнению с точной стыковкой на рис. 3, b. На обоих рисунках горизонтальные жирные линии обозначают уровни значений ξ_i , а вертикальные штриховые — границы поддиапазонов.

Выше отмечалось, что для любого ξ в области сосуществования двух ветвей (см. рис. 3, a) при значениях θ_0 , промежуточных относительно таковых для ветвей, оптимальный диаметр пучка $d_0 > 0,25$. На рис. 4 представлена зависимость $d_{0\max}(\xi)$ экстремальных значений этого параметра. Процедура её построения такая же, как и на рис. 3, a, но с другим условием: $d_0 = d_{0\max}$. В строгом смысле экстремум гладкой зависимости $d_0(\theta_0)$ существует только для $\xi < -4,86^\circ$. Когда угол ξ по мере роста становится равным $-4,86^\circ$ (штриховая линия 2), экстремум «наезжает» на переход граничного значения θ_1 через нуль. Далее экстремум уже не достигается; величина $d_{0\max}$, привязанная к границе $\theta_1 = 0$, продолжает увеличиваться и при $\xi = 0^\circ$ приобретает наибольшее значение: $d_{0\max} = 0,303$. Одновременно минимизируется расстояние \tilde{l} ($\tilde{l} = \tilde{l}_{\min}$) согласно (9). В данной конфигурации ДИНЗ с НФЧЭ зеркала 4.1 и 4.2 (см. рис. 1) взаимно параллельны и при $\theta_1 = 0^\circ$ парциальные пучки «скользят» по граням C_1C_3 и C_1C_4 внутри СДК и по граням C_3C_2 и C_4C_2 снаружи соответственно. Далее для $\xi > 0^\circ$ по мере роста этого угла параметр $d_{0\max}$ достигается при значениях $\theta_1 = 0^\circ$ и $\tilde{l} = \tilde{l}_{\min}$ и одновременно уменьшается до 0,25 в конце нижней ветви (штриховая линия 8 на рис. 3, a). Часть кривой 1 на рис. 4, лежащая выше штрихпунктирной линии 3, ограничивается интервалом значений $\xi = -13,14 \dots 14,93^\circ$, внутри которого $d_{0\max} \geq 0,25$.

Заключение. Рассмотренный в данной работе ДИНЗ с НФЧЭ, в котором конструктивно заложена возможность перестановки зеркал, НФЧЭ и оси вращения в несколько фиксированных положений, позволяет комфортно эксплуатировать прибор в непрерывном диапазоне половинного угла схождения $\alpha = 23,0-83,2^\circ$ с шириной $\Delta\alpha = 60,2^\circ$, используя пучок диаметром в 1/4 размера СДК. Во всём диапазоне сохраняется нулевая разность хода по осям парциальных пучков (возможные отклонения от нуля обусловлены только погрешностями изготовления). Вопрос о конструкции интерферометра не ставится, но

представляется, что практическая реализация предложенного прибора не будет чрезмерно сложной. При этом прибор достаточно компактен: приблизительно $2,5A \times 2,8A \times 1,5A$ с учётом конструктивных припусков. Например, если длина ребра СДК $A = 25,4$ мм, то размеры интерферометра вписываются в объём $65 \times 75 \times 35$ мм. Ещё более компактен вариант интерферометра с параллельными зеркалами ($\xi = 0^\circ$): приблизительно $45 \times 45 \times 30$ мм, т. е. немного больше самого СДК. В нём угол α перестраивается в интервале $45,00$ – $65,92^\circ$ ($\Delta\alpha = 20,92^\circ$), оптимальный диаметр пучка $7,7$ мм, а расстояние от СДК до НФЧЭ около 6 мм. В отношении кинематики наиболее целесообразно вращать источник светового пучка относительно интерферометра. В этом случае два или три интерферометра удобно комбинировать для записи двух- или трёхмерных структур с варьируемым в широком диапазоне периодом независимо в каждом измерении. Такие многомерные интерферометры могут найти применение, например, в голографической литографии для изготовления голографических фотонных кристаллов [7]. Наконец, конструктивно оптические элементы ДИНЗ с НФЧЭ (СДК, зеркала и НФЧЭ) образуют жёсткий оптический блок, что позволяет при необходимости создать прибор с высокой виброустойчивостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pat. DE1285763 В.** Verfahren zur Herstellung optischer Beugungsgitter /J. Heidenhain, H. Burkhardt, H. Kraus. Publ. 19.12.1968.
2. **Шелковников В. В., Васильев Е. В., Герасимова Т. Н. и др.** Динамика импульсной записи голографических дифракционных решеток в фотополимерном материале // Оптика и спектроскопия. 2005. **99**, № 5. С. 838–847.
3. **Микерин С. Л., Угожаев В. Д.** Простой двухлучевой интерферометр на основе светоделительного кубика // Оптика и спектроскопия. 2011. **111**, № 6. С. 1019–1025.
4. **Микерин С. Л., Угожаев В. Д.** Перестраиваемый голографический интерферометр с неподвижными зеркалами // Автометрия. 2012. **48**, № 4. С. 20–32.
5. **Микерин С. Л., Угожаев В. Д.** Перестраиваемый голографический интерферометр со светоделительным блоком и неподвижными зеркалами // Автометрия. 2014. **50**, № 2. С. 110–120.
6. **Угожаев В. Д.** Перестраиваемый вращением двухлучевой интерферометр с неподвижным фоточувствительным элементом. Ч. I. Интерферометр на основе светоделительного кубика // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 57–65.
7. **Пен Е. Ф., Шаталов И. Г.** Спектральные характеристики моделей голографических фотонных кристаллов // Автометрия. 2014. **50**, № 2. С. 84–94.

Поступила в редакцию 22 октября 2015 г.