

МНОГОПОРЯДКОВЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ ПЕРИОДА

Среди дифракционных оптических элементов особое место занимают многопорядковые светоделительные решетки, обладающие способностью расщеплять падающий на них лазерный пучок на несколько пучков, распространяющихся под различными углами и равных по интенсивности (или с заданными соотношениями интенсивностей). С одной стороны, многопорядковые решетки не имеют аналогов среди обычных оптических элементов, а с другой – сравнительно просты для изготовления. Их периодическая структура состоит из прямолинейных штрихов различной ширины и легко поддается синтезу на стандартном фотолитографическом оборудовании, а профиль является прямоугольным и реализуется путем однократного ионного или химического травления подложки.

В свое время многопорядковые решетки были предложены и изготовлены [1, 2] как структуры с симметричным расположением штрихов в периоде относительно его середины (рис. 1а). В этом случае наличие K штрихов в периоде обеспечивает K свободных параметров (на рис. 1а это $\sigma_1 - \sigma_3$), то есть величин, которые можно независимо изменять, добиваясь заданного соотношения интенсивностей в порядках дифракции. Если отказаться от указанной симметрии и варьировать положения границ штрихов в левой и правой частях периода независимо друг от друга, то при том же числе штрихов K оказывается уже $(2K-1)$ свободных параметров (рис. 1б). Из рис. 1б ясно, что положение хотя бы одной из границ штрихов, например σ_1 , необходимо зафиксировать.

Увеличение числа свободных параметров расширяет, естественно, возможности влияния на интенсивности света в порядках дифракции. Формально при наличии K штрихов в периоде можно обеспечить равенство $(K+1)$ бокового порядка с каждой стороны от нулевого при симметричном периоде и $2K$ боковых порядков – при несимметричном. Всего с учетом нулевого порядка обеспечивается $N=2K+3$ равных порядка в первом случае и $N=4K+1$ – во втором. На практике далеко не всегда удается добиться максимально возможного числа равных порядков дифракции, особенно для несимметричного профиля; однако отказ от симметрии во всех случаях позволяет увеличить число равных порядков при том же количестве штрихов примерно в 1,5 раза или уменьшить количество штрихов в той же пропорции при сохранении числа равных порядков (рисунки 2, 3).

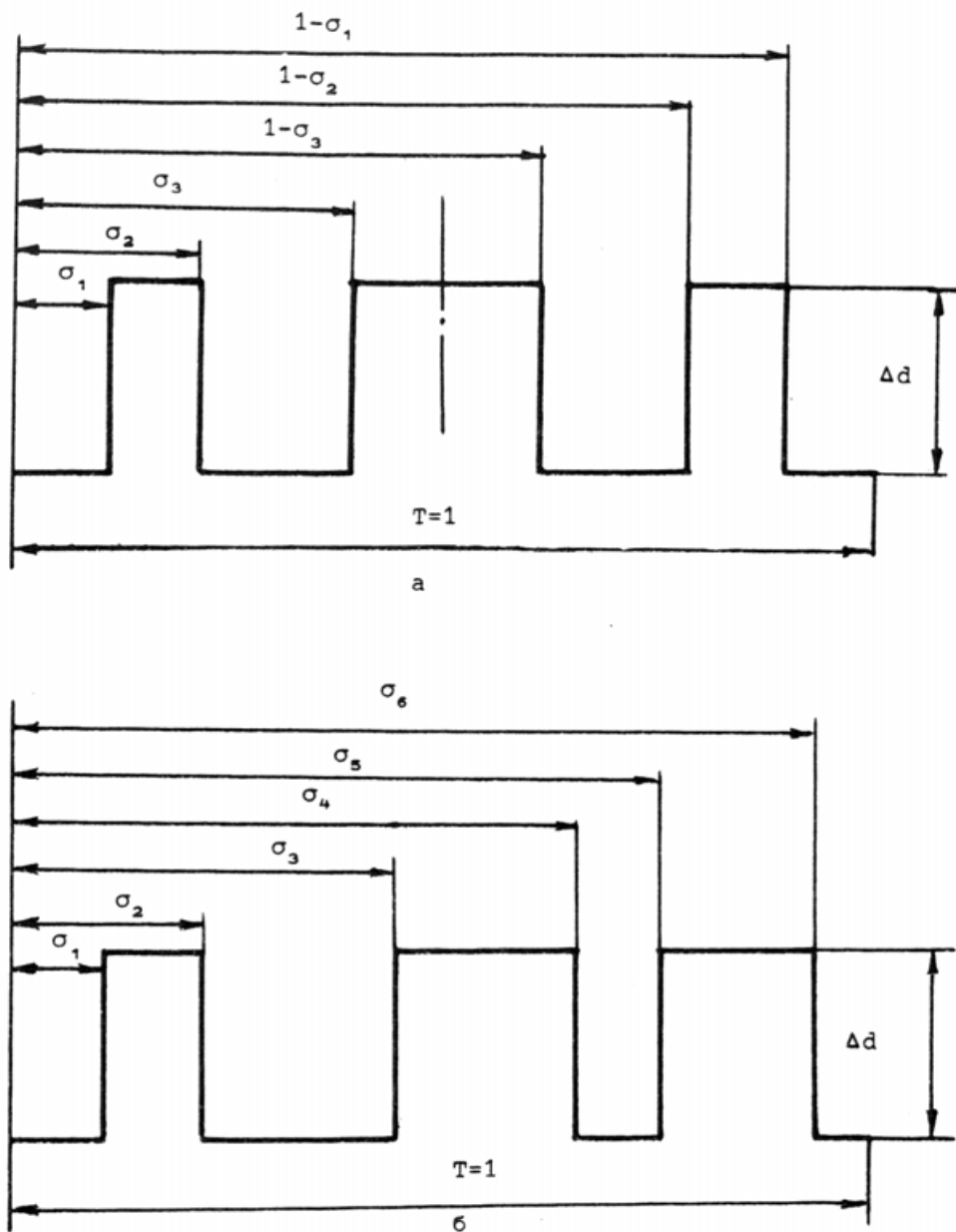


Рис. 1. Профили симметричной (а) и несимметричной (б) решеток с тремя штрихами в периоде: T-период

Расчет интенсивностей света в порядках дифракции решетки с несимметричным профилем производится по формулам:

$$\left. \begin{aligned} I_b &= \frac{\sin^2 \frac{\Phi}{2}}{\pi^2 l^2} (C_1^2 + S_1^2), \quad l \neq 0; \\ I_0 &= 1 - 4Q(1-Q) \sin^2 \frac{\Phi}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

I_1 - интенсивность света в 1-ом порядке дифракции.

Величины C_1 , S_1 , Q даются выражениями:

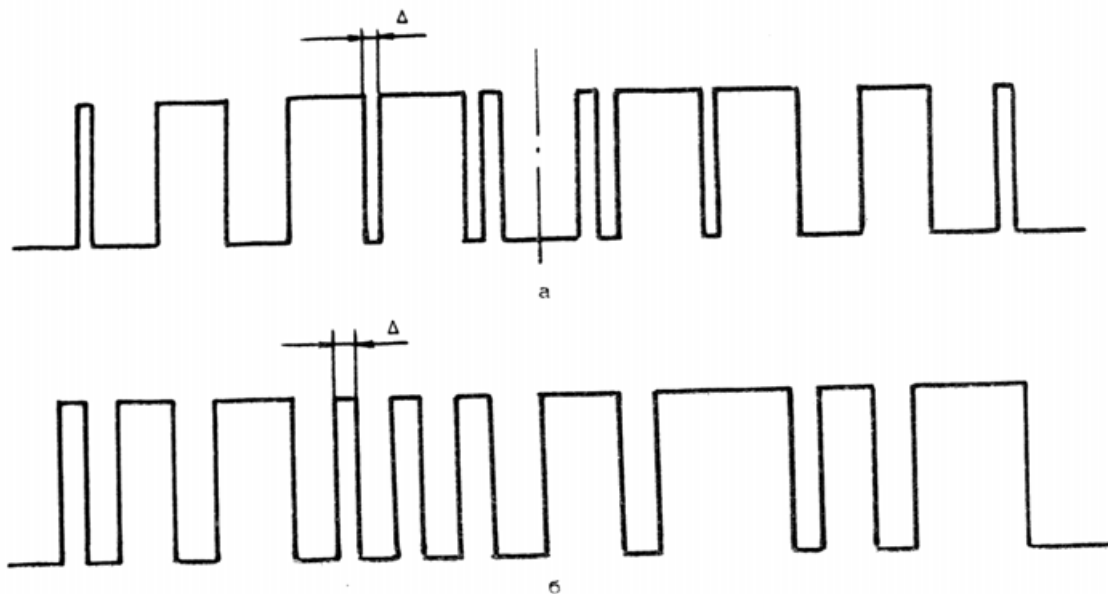


Рис. 2. Профили симметричной (а) и несимметричной (б) решеток с десятью штрихами в периоде:
 а) $N=23$, $\eta=65\%$, $\Delta=0,011$;
 б) $N=35$, $\eta=75\%$, $\Delta=0,020$

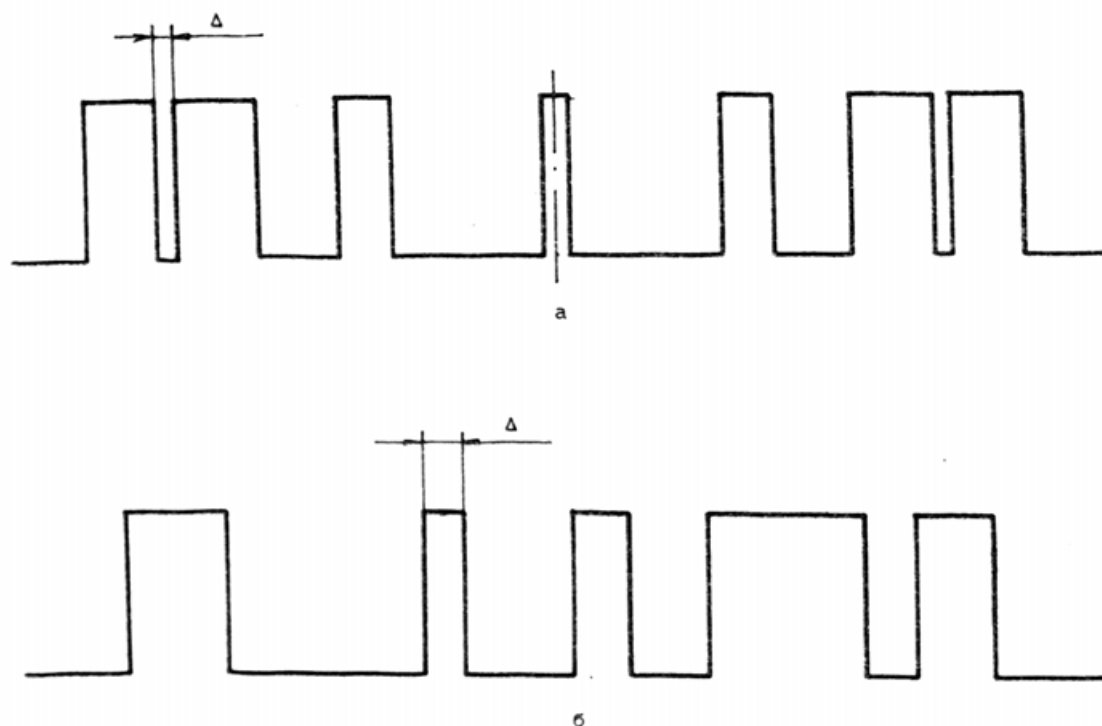


Рис. 3. Профили 17-порядковых симметричной (а) и несимметричной (б) решеток:
 а) $K=7$, $\eta=61\%$, $\Delta=0,017$, $\Phi=\pi$;
 б) $K=5$, $\eta=76\%$, $\Delta=0,037$, $\Phi=\pi$

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \sum_{k=1}^{2K} (-1)^k \cos 2\pi l \sigma_k; \\ S_1 &= \sum_{k=1}^{2K} (-1)^k \sin 2\pi l \sigma_k; \\ Q &= \sum_{k=1}^{2K} (-1)^{k+1} \sigma_k; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Φ - фазовая модуляция света на профиле решетки, равная

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d (n-1), \quad (3)$$

где

Δd - глубина профиля;

n - показатель преломления материала решетки;

λ - длины волны света.

Если профиль симметричный, то для всех k соблюдается условие

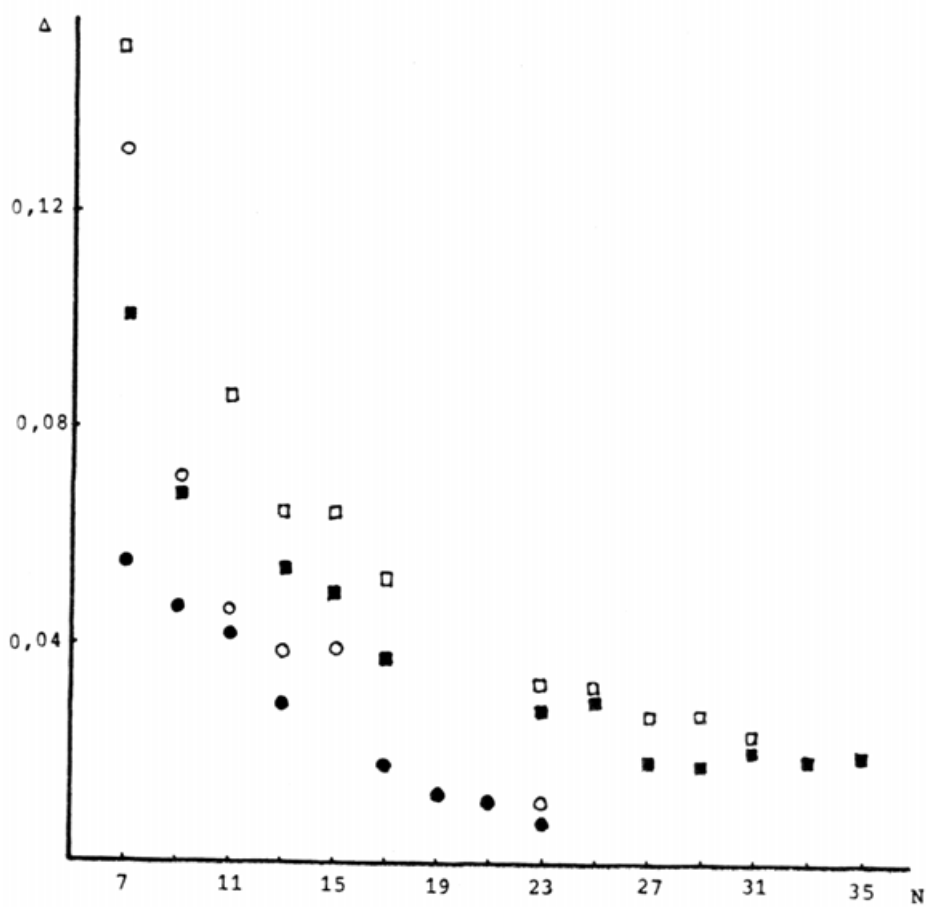
$$\sigma_k = 1 - \sigma_{2k+1-k} \quad (4)$$

и формулы (1, 2) сводятся к известным выражениям [2].

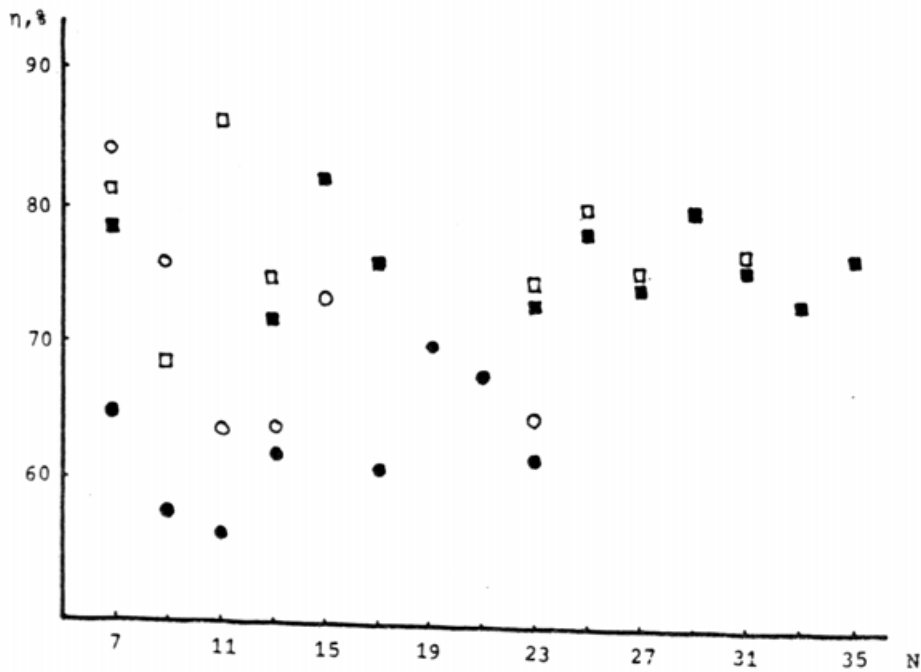
Методика расчета решеток фактически не изменилась по сравнению с симметричным случаем [2] с тем исключением, что новая программа позволила более эффективно и целенаправленно в диалоговом режиме получать решения с необходимыми свойствами. В результате проделанных расчетов удалось прежде всего значительно увеличить максимально достигнутое общее число равных по интенсивности порядков дифракции ($N_{\max} = 35$ вместо $N_{\max} = 23$) (рис. 2). Отметим, что эффективность в рабочих порядках η и ширина минимального штриха Δ у 35-порядковой несимметричной решетки больше, чем у 23-порядковой симметричной.

Сводные результаты по всем полученным решениям (как симметричным, так и нет) представлены на рис. 4. Следует констатировать, что несимметричные решетки обладают значительным преимуществом в отношении такого важного при изготовлении параметра, как ширина минимального штриха в периоде. Что особенно важно, приемлемую величину этого параметра удается успешно сочетать с высокой эффективностью и глубиной профиля, соответствующей фазовой модуляции $\Phi = \pi$ (известно, что подобные решетки допускают наибольшие отклонения от номинальной глубины профиля при изготовлении).

Для сравнения на рис. 3 представлены профили решеток, обеспечивающих 17 равных по интенсивности порядков дифракции. Нетрудно видеть, что несимметричное решение превосходит симметричное практически во всех отношениях: эффективность η выше в 1,25 раза, ширина минимального штриха больше в 2,2 раза. Кроме того, расчеты показывают, что несимметричное решение допускает примерно в 2 раза больший уход размеров штрихов от номинала.



а



б

Рис. 4. Ширина минимального штриха (а) и общая эффективность в рабочих порядках (б) симметричных (\circ, \bullet) и несимметричных (\square, \blacksquare) решеток с различным числом равных порядков:
 \circ, \square - решения с максимальной шириной минимального штриха;
 \bullet, \blacksquare - решения с фазовой модуляцией $\Phi=\pi$

Оказывается, однако, что несимметричные решетки более чувствительны к отклонению формы профиля от прямоугольной. При изготовлении дифракционных элементов практически невозможно получить такую идеальную структуру, какая показана на рис. 1. Истинная конфигурация штрихов решетки довольно сложна и вряд ли полностью воспроизводится, но, во-видимому, с достаточной для практических целей точностью ее можно аппроксимировать трапециевидным профилем (рис. 5). Основным параметром, характеризующим этот профиль, является ширина скоса h , которая предполагается одинаковой для границ всех штрихов. Причиной появления скоса служит подтравливание подложки под фоторезистивной маской при химическом травлении или разрушение краев маски при ионном травлении [2], поэтому величину h называют клином травления.

Необходимо также учитывать отклонение середины скоса от расчетного положения границы штриха $\Delta\sigma$ (см. рис. 5). Предполагается, что эта величина постоянна по абсолютному значению для всех границ в профиле и имеет различный знак для соседних границ:

$$\Delta\sigma_k = (-1)^k \Delta\sigma, \quad (5)$$

то есть реализуется согласованный уход размеров [2], характерный для фотолитографического изготовления решеток.

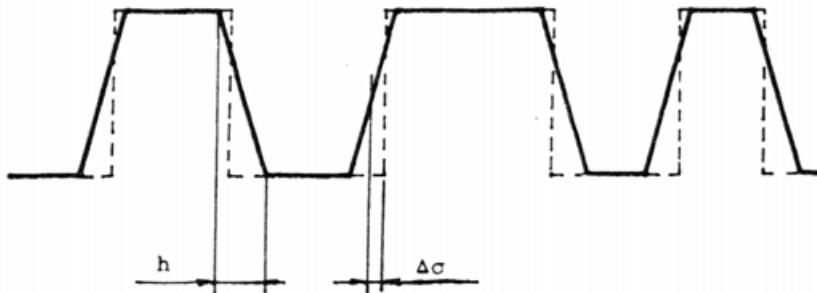


Рис. 5. Трапециевидный профиль реальной решетки (пунктиром показан идеальный расчетный профиль):

$\Delta\sigma$ - согласованный уход размеров;
 h - клин травления

Рассматривая при указанных условиях эффективность решетки в 1-ом порядке дифракции и ограничиваясь зависимостью от первых степеней $\Delta\sigma$ и h , поскольку это малые величины, получаем следующее приближенное выражение:

$$I'_1 = I_1 + \frac{4\Delta\sigma}{\pi l} (S_1 C'_1 - C_1 S'_1) - \frac{4h}{\pi^2 l} (C_1 C'_1 + S_1 S'_1), \quad (6)$$

где I_1 , C_1 , S_1 даются соотношениями (1), (2), а C'_1 , S'_1 равны:

$$\left. \begin{aligned} C'_1 &= \sum_{k=1}^{2K} \cos 2\pi l \sigma_k; \\ S'_1 &= \sum_{k=1}^{2K} \sin 2\pi l \sigma_k. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Из (6) прежде всего следует, что при согласованном уходе размеров происходит нарушение заданных соотношений интенсивностей в порядках с разными номерами, но симметрия спектра решетки, то есть равенства вида $I_1 = I_{-1}$, сохраняется, поскольку величина $(S_1 C'_1 - C_1 S'_1)/l$ не зависит от знака l . Указанный эффект имеет место как для симметричных, так и для несимметричных решеток, причем последние, как правило, более устойчивы к уходу размеров (уже отмечалось, что несимметричная 17-порядковая решетка допускает примерно в 2 раза больший уход размеров, чем симметричная).

Наличие клина травления не приводит в первом приближении к разбросу интенсивностей в порядках с различными номерами (точнее, сохраняется равенство сумм вида $I_1 + I_{-1}$ для различных l), но симметрия спектра нарушается:

$$I_{-1} - I_1 = \frac{8h}{\pi^2 |l|} (C_1 C'_1 + S_1 S'_1). \quad (8)$$

В случае симметричного периода, то есть при выполнении условия (4), как нетрудно убедиться, $C_1 = S'_1 = 0$, то есть асимметрия спектра не может возникнуть в принципе.

Таким образом, переход к несимметричному профилю периода приводит к необходимости более точного соблюдения прямоугольности профиля штрихов. С другой стороны, анализ распределения интенсивности света по порядкам дифракции реально изготовленной несимметричной решетки позволяет независимо от ухода размеров определить такой важный технологический параметр, как клин травления h . Для решеток с симметричным периодом это можно сделать только косвенно, предполагая непосредственную связь между клином травления и сдвигом границы штриха [2], а также зная размеры штрихов в созданной перед травлением фоторезистивной маски.

На рис. 6 представлены гистограммы спектров двух 17-порядковых решеток (показаны только рабочие боковые порядки), изготовленных в виде рельефа в стеклянной подложке, а также наиболее близкие к реальным теоретические спектры, рассчитанные по формулам (6)–(7). Оптимальные значения $\Delta\sigma$ и h определялись по минимуму среднеквадратичного отклонения ΔI интенсивностей в боковых рабочих порядках теоретического спектра от реально измеренного распределения. В обоих случаях, представленных на рис. 6, величина ΔI не превышала 1,7%. Полученные результаты свидетельствуют о допустимости использования модели трапецевидного профиля при

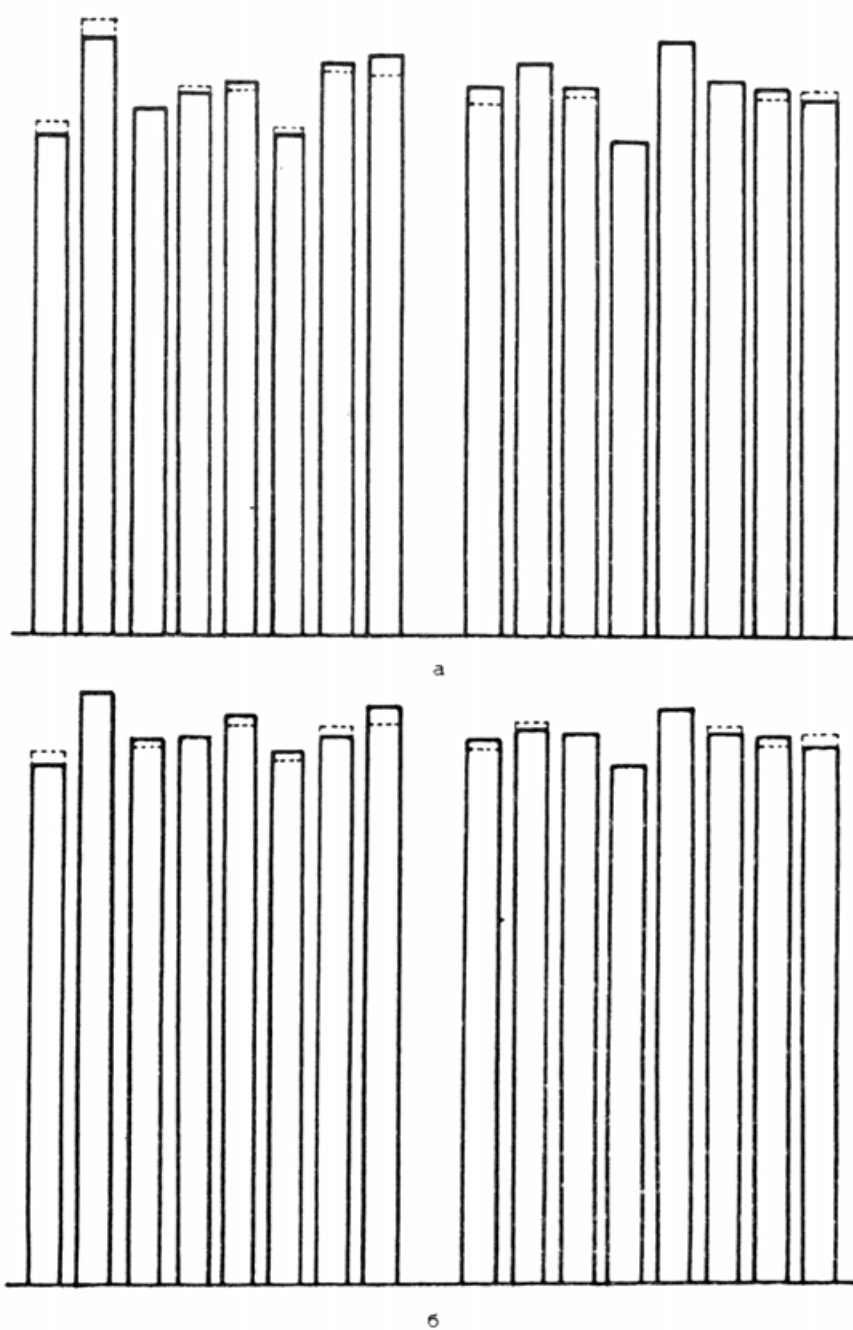


Рис. 6. Спектры реально изготовленных 17-порядковых решеток с периодом $T=159$ мкм (пунктиром показаны наиболее близкие теоретические спектры):
 а) $\Delta\sigma=-0,18$ мкм, $h=0,55$ мкм, $\Delta I=1,7\%$;
 б) $\Delta\sigma=-0,06$ мкм, $h=0,40$ мкм, $\Delta I=1,4\%$

расчете требуемых допусков на размеры и форму профиля штрихов многопорядковых решеток.

Л и т е р а т у р а

1. Д а м м а н н Н., Г ö r t l e r К. Opt. Commun, 1971, v. 3, p. 312.
2. Б о б р о в С.Т., К о т л е ц о в Б.Н., М и н а - к о в В.И. и др. Дифракционные решетки с порядками одинаковой интенсивности. - В кн.: Голографические системы // Науч. тр./НЭТИ, Новосибирск, 1978, вып. 2, с. 123-129.