

# Пример расчета дифракционной эффективности голограмм с асимметричным профилем полосы

А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин

ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия

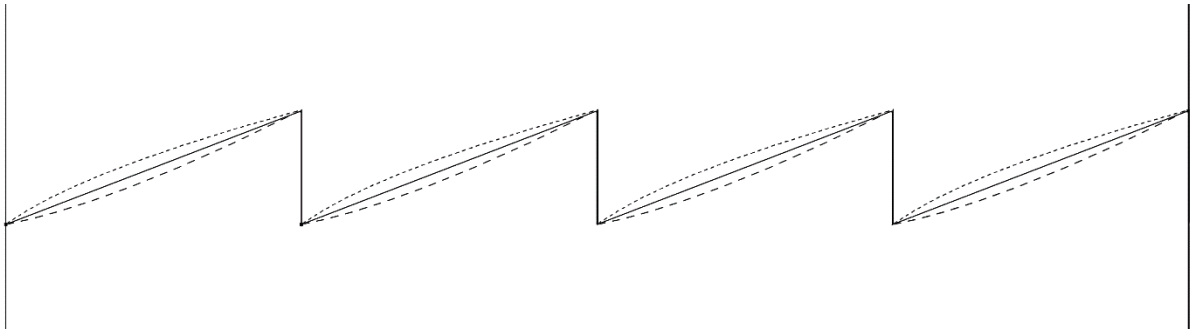
В докладе представлены результаты численного моделирования дифракции света на структурах с асимметричным профилем микрорельефа конечно-разностным методом COMSOL. Учтена неоднородность отклика ЖК модулятора по полю. Предложены рекомендации для достижения желаемого рельефа с учетом нелинейности кривой чувствительности фоторезиста и неоднородности интенсивности освещающего пучка.

*Ключевые слова:* Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы.

*Цитирование:* Смык, А. Ф. Пример расчета дифракционной эффективности голограмм с асимметричным профилем полосы / А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 211–215.

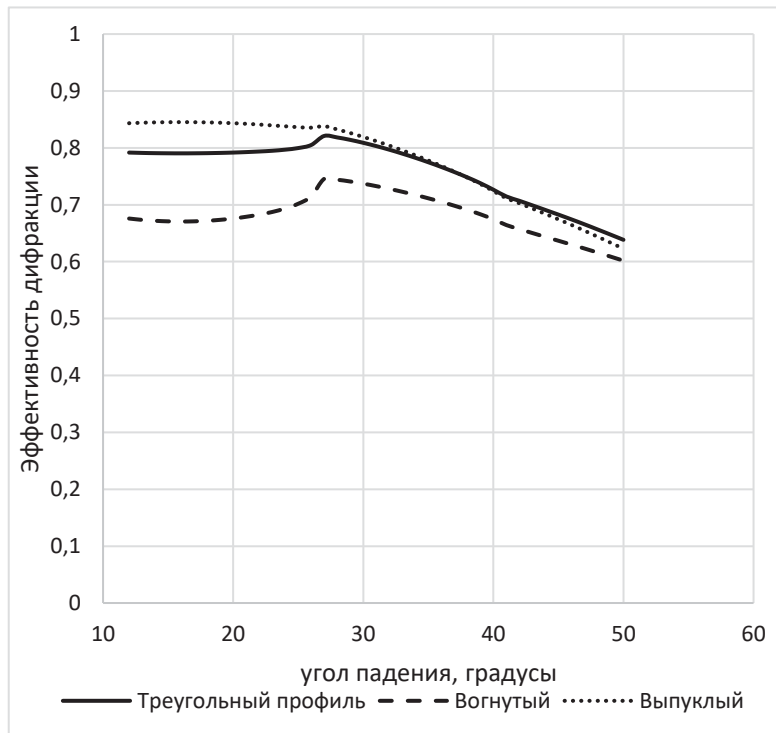
Одним из главных потребительских свойств защитных голограмм является яркость, которая зависит от профиля полосы в поперечном ее сечении. Если голограмма записывается при интерференции монохроматических световых волн, форма профиля полосы близка к синусоидальной. Дифракционная эффективность тогда не превышает 33% [1]. Если профиль полосы приближается к прямоугольному, можно добиться дифракционной эффективности в полезном порядке, близкой к 40% [2]. На практике этого стараются добиться подбором режимов экспонирования и проявления регистрирующей среды. На этом возможности симметричного профиля исчерпываются. В системах типа Дот-матрикс, в которых применяются жидкокристаллические (ЖК) модуляторы излучения и проекционная система для экспонирования фоторезиста, можно попытаться управлять профилем и записать асимметричные рельефы. Если в асимметричном пилообразном профиле угол дифракции от периодической структуры совпадает с отражением нулевого порядка от одной из сторон профиля, яркость в этом порядке радикально увеличивается [3]. Так называемые эшелетты позволяют уменьшить дифракцию во все порядки, кроме одного, тем самым существенно подняв яркость в «полезном» порядке.

Однако, обеспечение высокой эффективности дифракции для желаемого порядка накладывает высокие требования к соблюдению профиля полос. Для изучения влияния технологических факторов было проведено численное моделирование дифракции света на отражающей решетке со строго пилообразным профилем и с искажениями формы, приводящими к выпуклому и вогнутому профилю штриха. Для расчетов использовалось отклонение формы профиля на  $\pm 10\%$ . Примерно к таким отклонениям приводит термическая усадка термопластичных лаков на голографических материалах или усадка вследствие полимеризации мономерного слоя фотополимера. В модели исследовалась дифракционная решетка с периодом 1 мкм, сделанная из алюминия и находящаяся в воздухе (Рис. 1).



**Рис. 1.** Участок треугольной дифракционной решетки. Точками и пунктиром обозначены искаженные профили

В результате расчета дифракционной интенсивности для -1 порядка дифракции в пакете COMSOL выяснилось, что указанное отклонение формы профиля приводит к существенному колебанию яркости (Рис. 2), которое, к тому же, зависит от угла падения освещающего пучка, его отличия от угла блеска.



**Рис. 2.** Дифракционная эффективность -1 порядка дифракции в зависимости от угла падения

Можно видеть, что искажение профиля менее чем на 10% приводит к сопоставимому колебанию яркости наблюдаемой голограммы.

На практике к отклонению формы профиля от желаемой может приводить множество факторов, например, изменение температуры среды, погрешность в длительности проявления, усадка фотополимера в процессе рекомбинации и другие. При этом существенным источником искажений в системах Дот-матрикс может являться сам ЖК

модулятор. Каждый из этих факторов может дополнительно приводить и к неравномерности высоты рельефа, что также негативно скажется на яркости полезного порядка.

Поэтому крайне важно контролировать и либо минимизировать, либо компенсировать вклады каждого этапа производства на форму профиля дифракционных полос.

Современные пространственные модуляторы излучения как правило позволяют корректировать так называемую гамма-кривую в зависимости от потребностей пользователя. Такая операция необходима для обеспечения линейной зависимости между выводимыми градациями серого и фазовым сдвигом. Однако, этого недостаточно, поскольку отклик модулятора еще и неравномерен по площади.

ЖК модулятор типа LCoS HED-6001 [4] помимо настройки гамма-кривой требует дополнительной компенсации неравномерности по полю. На рис. 3 приведено распределение яркости модулированного излучения при том, что на LCoS выводилась равномерная серая заливка с индексом 100 (0- черный, 255- белый).



**Рис. 3.** Распределение яркости модулированного излучения

Отклонения яркости от среднего значения для некоторых значений заливки достигало 23%. Соответственно, данную неравномерность необходимо учитывать и корректировать в процессе подготовки проецируемых распределений. Причем, как величина колебаний, так и общая структура «пятен» меняется с изменением величины серого.

Освещение лазерным пучком также неравномерно. Для компенсации этой неравномерности применим тот же подход с коррекцией выводимого серого.

Было обнаружено, что данные ошибки зависят от температуры модулятора излучения. Соответственно, для успешного применения коррекции, особенно, в случаях работы с мощными источниками излучения, необходимо уделить внимание стабилизации температуры рабочей площадки модулятора.

На рис. 4 приведены микрофотографии нескольких участков голограммы с асимметричным профилем без и с коррекцией неравномерности модуляции по полю. Можно видеть, что данный тип коррекции может оказаться необходим, если конкретный ЖК модулятор не обеспечивает достаточной равномерности.

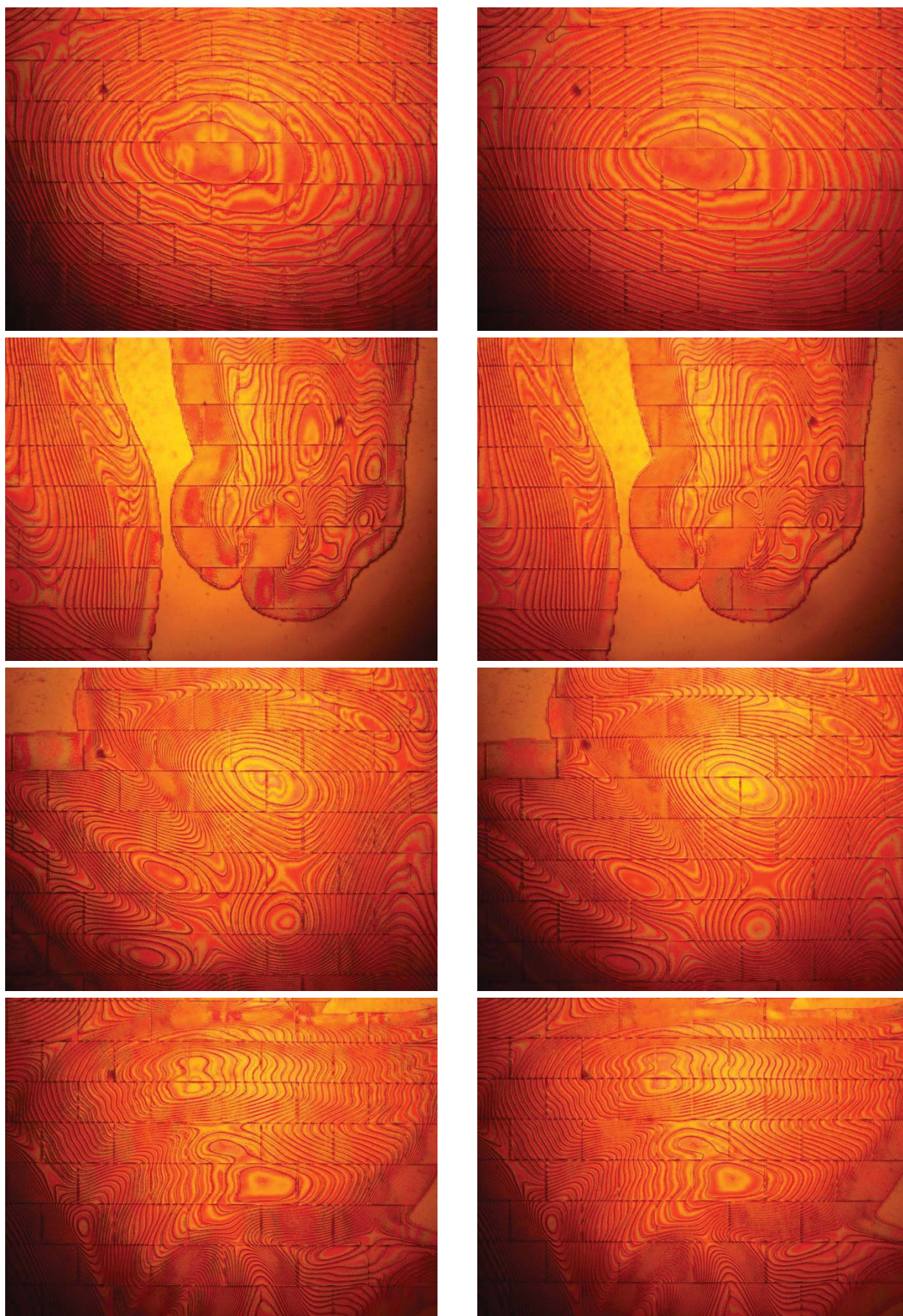


Рис. 4. Сравнение результатов записи без коррекции по полю (слева) и после ее применения (справа)

## Заключение

Для обеспечения наибольшей дифракционной эффективности дифракции в полезном порядке целесообразно применять асимметричный профиль и придерживаться рекомендованных пространственных частот, где влияние технологических погрешностей минимально. Компенсационная коррекция неоднородности отклика пространственного модулятора и неоднородности его засветки, а также нелинейности отклика регистрирующей среды необходима при записи ярких и малозумных голограмм.

## Список источников

- [1] А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин. Асимметричные профили в поверхностно-рельефных голограммах // Мир техники кино. — 2018. — №1(12). — С. 23–30.
- [2] **Collier, R.** Jr Optical Holography / R. Jr Collier, K. Berkhart, L. Lin. Translation from English edited by U.I. Ostrovsky // М.: Mir. — 1973. — P. 258.
- [3] **Stamm, R.** F. Energy distribution of diffraction gratings as function of groove form / R. F. Stamm, N J. Whale // JOSA. — 1946. — Vol 36. — P. 2.
- [4] <https://holoeye.com/lcos-microdisplays/hed-6001-monochrome-lcos/>

## Diffraction efficiency computation for asymmetrical-profile hologram

*A. Smyk, A. Shurygin*

James River Branch LLC, Moscow, Russia

Computer simulations of laser beam diffraction on asymmetrical surface relief is presented. Finite-difference method allowed diffraction pattern distribution computation. Photoresist sensitivity curve and non-uniform laser illumination were taken into account.

*Keywords:* Optics, Holography, Diffraction efficiency, Asymmetrical profile, Microrelief diffraction.