

ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОЛОГРАММ
НА КРИСТАЛЛАХ NaCl-Ca

А. Н. Кравец и П. Д. Березин

Исследована зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) голограмм Фурье, записанных с помощью He—Cd лазера ЛГ-31 (441.6 нм) при 130° С на окрашенных рентгеновским излучением кристаллах NaCl-Ca, от времени экспозиции и от длины волны (λ) восстанавливающего луча. М-образная форма зависимости ДЭ от λ с максимумами, расположенными на спадах *F*-полосы поглощения, свидетельствуют о том, что полученные голограммы являются преимущественно фазовыми. Исследование их угловой чувствительности показало, что они являются объемными. Максимальное значение ДЭ 8.5% оказалось меньше расчетного и достигалось при затратах энергии 120 мДж·см⁻².

Основной характеристикой голографического материала является дифракционная эффективность (ДЭ), определенная как отношение интенсивности восстановленного голограммой луча к интенсивности падающего света. Только объемные фазовые голограммы позволяют получить ДЭ до 100% [1].

Радиационно окрашенные кристаллы NaCl позволяют хранить оптическую информацию с плотностью до 10⁸ бит·см⁻² [2], а легирование их кальцием существенно увеличивает радиационную и оптическую чувствительность, уменьшая усталость кристалла при многократном повторении процесса (радиационное окрашивание—оптическое обесцвечивание в *F*-полосе поглощения [3]). Кроме того, кальций подавляет коагуляцию *F*-центров в сложные электронные центры (*M*, *R*, *N*) [3], приводя к уменьшению «фона» под *F*-полосой за счет наложения на нее *M*- и *R*-полос, что позволяет получить более высокую ДЭ голограмм.

Голограммы Фурье записывались с помощью He—Cd лазера ЛГ-31 (441.6 нм), работающего в одномодовом режиме, на пластинках NaCl + 0.11% Ca, окрашенных рентгеновским излучением (трубка БХВ-7-Сн, 40 кВ, 30 мА) при 25° С в течение двух часов. Пластинки 10×15×1 мм³ выкальвывались из монокристалла, выращенного из расплава. Концентрация кальция в них определялась с помощью пламенного фотометра «Перкин—Эльмер». Окрашенный кристалл с оптической плотностью ~ 8 в максимуме *F*-полосы (465 нм при 25°С) закреплялся на специальном держателе с печкой и нагревался в темноте до 130° С со средней скоростью 0.5 град·с⁻¹. Во время записи голограммы температура кристалла стабилизировалась с точностью 0.1° С.

Луч лазера с помощью полупрозрачного зеркала делился на два луча одинаковой интенсивности, которые падали на кристалл под одинаковым углом $\theta = 7^\circ$. На пути одного из лучей за кристаллом помещался ФЭУ-55, который автоматически подключался к запоминающему осциллографу С8-2 в момент периодического перекрытия этого луча с помощью реле. ФЭУ работал в линейном режиме, что проверялось с помощью набора нейтральных фильтров с известным пропусканием. Перед ФЭУ помещалась диафрагма и светофильтр, выделяющий длину волны излучения лазера. Абсолютное значение интенсивности света измерялось калиброванным фотодиодом ФД-7К и составляло 6 мВт·см⁻².

На рис. 1 приведена зависимость ДЭ голограммы от времени экспозиции. Максимальное значение ДЭ составляло 5.2% и достигалось при затратах энергии 120 мДж·см⁻². Изменение оптической плотности кристалла во время записи голограммы (рис. 1) регистрировалось с помощью ФЭУ и двухкоординатного потенциометра ПДС-021 с регулируемым блоком временной развертки, который калибровался генератором импульсов Г5-26.

ДЭ объемной амплитудно-фазовой голограммы можно оценить [1] по формуле

$$\eta = \eta_1 + \eta_2, \quad (1)$$

где $\eta_1 = e^{-\sigma} \text{sh}^2 \varphi_1$ — ДЭ амплитудной голограммы; $\eta_2 = e^{-\sigma} \sin^2 \varphi_2$ — ДЭ фазовой голограммы; $\sigma = 2.3D/\cos \theta$, $\varphi_1 = 2.3D_1/4 \cos \theta$, $\varphi_2 = \pi n_1 d/\cos \theta$; D — среднее значение оптической плотности; D_1 и n_1 — амплитуды модуляции оптической плотности и показателя преломления, d — толщина голограммы, λ — длина волны света.

Из дисперсионных соотношений [4] следует, что наибольшее изменение показателя преломления достигается при λ , соответствующих полуширине F -полосы поглощения (425 и 515 нм) и наименьшего — в максимуме F -полосы (472 нм при 130°С). Поэтому мы исследовали зависимость ДЭ полученных голограмм от длины волны падающего света.

Для этого в ряде кристаллов запись голограмм прекращалась после достижения максимальной ДЭ и кристалл быстро охлаждался со скоростью 2 град·с⁻¹ в темноте до 25°С. Затем кристалл закреплялся на поворотном столике и на него направлялся коллимированный луч света от монохроматора УМ-2. ДЭ измерялась с помощью ФЭУ-53 и гальванометра М-195. При фиксированном значении λ максимум ДЭ наблюдался при угле падения, соответствующем условию Брэгга, так что $\lambda/2 \sin \theta = \Lambda = 1.81$ мкм, где Λ — период голографической решетки. На рис. 2 приведен также спектр поглощения кристалла в голограмме (среднее значение оптической плотности), измеренный спектрофотометром СФ-4А при 25°С.

М-образная форма зависимости ДЭ от λ (рис. 2) с максимумами при 420 и 519 нм свидетельствует о том, что полученные голограммы являются преимущественно фазовыми.

На рис. 3. приведено изменение ДЭ голограмм при отклонении θ от условий Брэгга при $\lambda = 519$ нм. Полуширина кривой угловой чувствительности $2\Delta\theta_{1/2} = 50'$, поэтому толщина голограммы приблизительно равна [1]: $d = \Lambda/2\Delta\theta_{1/2} = 125$ мкм.

Исследование окрашенного слоя с помощью микрофотометра показало, что оптическая плотность кристалла по глубине изменяется по экспоненте. Можно выделить приповерхностный слой толщиной ~120 мкм с высокой оптической плотностью и остальную значительно слабее окрашенную область — «хвост». При фототермообесцвечивании «хвост» обесцвечивается, однако средняя глубина оставшегося окрашенного слоя (140 мкм) превышает толщину голограммы, что уменьшает ее ДЭ. Средняя концентрация F -центров в голограмме составляла $1.1 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Полученные голограммы являются объемными, так как фактор Клейна для них $Q = 2\pi\lambda d/n\Lambda^2 = 67 \gg 10$.

С помощью интерферометра Рождественского нами установлено, что при обесцвечивании радиационно окрашенного кристалла NaCl-Ca гелий-кадмиевым лазером изменение его оптической плотности ΔD сопровождается изменением показателя преломления Δn , так что $\Delta n = \gamma \Delta D/h$, где

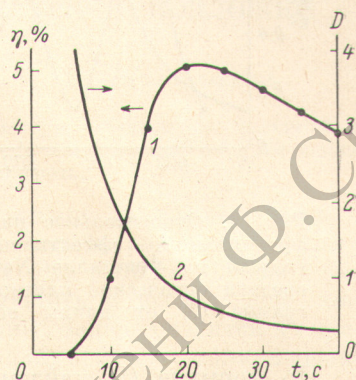


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности голограммы (1) и изменение средней оптической плотности в ней (2) от времени экспозиции радиационно окрашенного кристалла NaCl-Ca.

h — средняя толщина окрашенного слоя, $\gamma = 1.7 \cdot 10^{-5}$ см. Из спектра поглощения в голограмме (рис. 2) можно оценить амплитуду модуляции оптической плотности. Так, при $\lambda = 441.6$ нм $D_1 = D - D_\phi = 0.54$, где $D = 0.67$ — среднее значение оптической плотности, $D_\phi = 0.13$ — оптическая плотность, обусловленная «фоном» под F -полосой. Тогда амплитуда модуляции показателя преломления $n_1 = \gamma D_1/d = 0.73 \cdot 10^{-3}$.

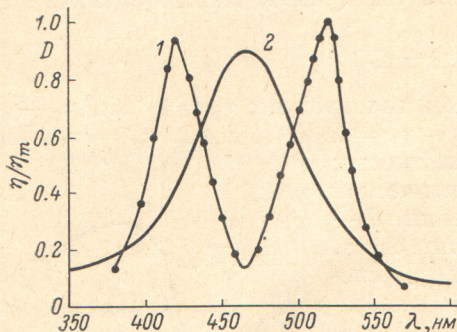


Рис. 2. Относительное изменение дифракционной эффективности голограммы на кристалле NaCl-Ca (1) и средней оптической плотности в голограмме (2) от длины волны света.

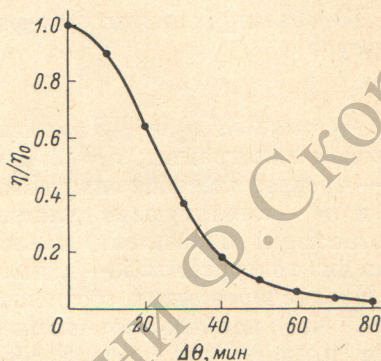


Рис. 3. Угловая чувствительность голограммы на кристалле NaCl-Ca при $\lambda = 519$ нм.

По формуле (1) найдем: $\eta_1 = 2.1\%$, $\eta_2 = 7.9\%$, $\eta = 10\%$. Однако экспериментально не удавалось наблюдать значения ДЭ более 8.5% даже при $\lambda = 519$ нм, что обусловлено рядом причин: превышением глубины окраски толщины голограммы, вибрацией голографического стола при записи голограммы, термообесцвечиванием кристалла при его охлаждении и дальнейшем хранении. В то же время ДЭ не превышала 0.5% в кристаллах NaCl-Ca и 0.2% в NaCl «ХЧ», если голограммы записывались при комнатной температуре. Вероятно, зависимость ДЭ от температуры носит активационный характер [5], однако с повышением температуры возрастает термообесцвечивание кристалла, поэтому должна существовать оптимальная температура, при которой ДЭ максимальна.

Литература

- [1] Н. Когелник. Bell Syst. Tech. J., 48, 2909, 1969.
- [2] А. Н. Кравец, В. П. Кузнецов, А. А. Курмангалиева. Изв. вузов СССР, физика, № 5, 140, 1973.
- [3] А. Н. Кравец, А. А. Жаксылыкова, Ф. С. Кравец. Опт. и спектр., 38, 955, 1975.
- [4] D. L. Dexter. Phys. Rev., 111, 119, 1958.
- [5] М. Ф. Дейген, С. Г. Одулов, М. С. Соскин, Б. Д. Шанина. ФТТ, 16, 1895, 1974.

Поступило в Редакцию 20 октября 1975 г.