

07;08

Угловое расщепление брэгговского дифракционного порядка в акустооптическом модуляторе при частотно-модулированной акустической волне

© С.Н. Антонов

Институт радиотехники и электроники РАН,
141190 Фрязино, Московская область, Россия
e-mail: olga-ant@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 2 апреля 2004 г. В окончательной редакции 4 сентября 2004 г.)

Рассматриваются эффекты углового расщепления брэгговского дифракционного порядка, возникающие при акустооптической дифракции света на частотно-модулированной акустической волне. Эффекты имеют место, когда размер светового пятна в зоне акустооптического взаимодействия больше, чем характерный пространственный период модулирующей функции. Обнаружено расщепление брэгговского дифракционного порядка в несколько лучей. Направления дополнительных лучей, их интенсивность и количество определяются параметрами модуляции. В частности, возникает ситуация, когда дифрагированное поле состоит из трех лучей равной интенсивности, отстоящих друг от друга на расстоянии, примерно равном дифракционной расходимости падающего луча, при суммарной эффективности дифракции порядка 100%. Это отличает данный режим дифракции от случая, когда в области взаимодействия генерируется несколько независимых звуковых волн и суммарная эффективность дифракции ограничивается возникающей интермодуляцией. Эффект использован при создании модуляторов для систем нанесения изображения мощными лазерами.

В ряде технических задач с использованием акустооптических (АО) брэгговских модуляторов возникает необходимость формировать дифрагированное поле в виде нескольких близко расположенных в угловом пространстве лучей. Принципиальным требованием при этом является то, чтобы такое формирование происходило бы без существенных потерь световой энергии, иными словами, чтобы при преобразовании единственного дифракционного брэгговского порядка в несколько лучей их суммарная мощность не уменьшалась. В частности, такая необходимость возникает в системах термического нанесения изображения мощным лазерным излучением, когда непосредственно в процессе записи изображения необходимо модифицировать распределение энергии в световом пятне на обрабатываемом материале [1].

Отметим, что при решении такой задачи очевидным методом — возбуждением в АО среде нескольких близких по частоте акустических волн возникают принципиальные ограничения суммарной мощности в дифракционных порядках. Эти ограничения связаны с „откачкой“ световой мощности в интермодуляционные порядки. Так, в известной работе [2] установлено, что если в звукопровод АО модулятора вводятся две независимые близкие по частотам акустические волны, то максимальная эффективность дифракции двух близко расположенных по углам дифракционных порядков не может превышать 68%.

В данной работе сообщается об обнаруженных особенностях АО взаимодействия, проявляющихся в расщеплении брэгговского порядка дифракции без потерь оптической мощности, что в большей мере решает поставленную техническую задачу.

Условия эксперимента показаны на рис. 1. Здесь через АО модулятор 1 с пьезопреобразователем 2 проходит

оптическое излучение 3 с размером пятна d (плоскость рисунка ортогональна плоскости дифракции). Акустическая волна являлась частотно-модулированным сигналом, угловая частота которой $\omega(t)$ в момент времени t записывается в виде известного выражения

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_m \sin \Omega t, \quad (1)$$

где ω_0 — центральное значение частоты, $\Delta\omega_m$ — максимальная величина отклонения (девиации) частоты от центрального значения, Ω — угловая частота модулирующего сигнала.

Соответственно для частот в герцах $\omega_0 = 2\pi f_0$, $\Delta\omega_m = 2\pi\Delta f_m$, $\Omega = 3\pi F$. Тогда индекс частотной мо-

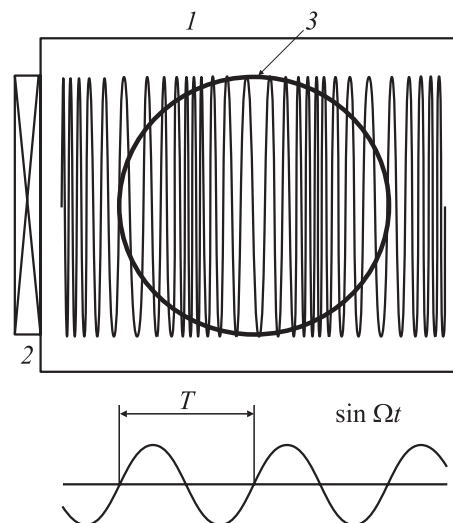


Рис. 1. Соотношения размеров светового пучка и периода изменения частоты звуковой волны.

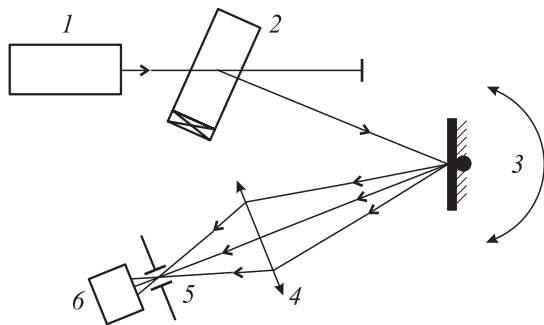


Рис. 2. Экспериментальная установка.

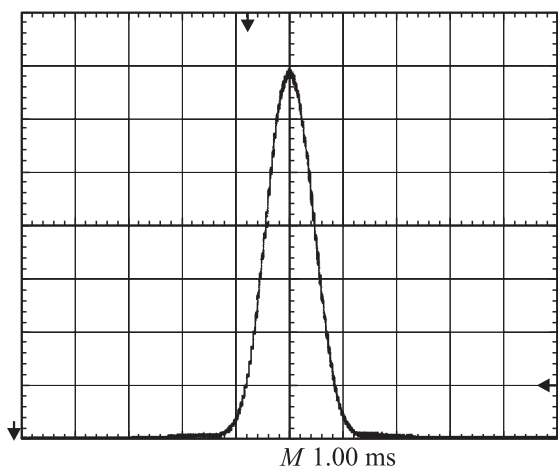


Рис. 3. Угловой спектр брэгговского порядка дифракции в отсутствие модуляции.

дуляции $M = \Delta f_m / F$. Для пространственного периода модулирующей функции T можно записать: $T = v / F$. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Здесь луч лазера 1 поступает на брэгговскую ячейку 2, дифрагированное излучение с выхода которой направляется на сканирующее по углу зеркало 3. После зеркала свет поступает на линзу 4, в фокальной плоскости которой установлены диафрагма 5 и фотоприемник 6. Такая система позволяла получать временную развертку углового спектра дифрагированного излучения. В качестве АО среды использовался монокристалл TeO_2 в режиме анизотропной дифракции на медленной акустической волне (скорость звуковой волны $v = 0.617 \cdot 10^6$ мм/с). Использовался волоконный одномодовый лазер на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм с линейной поляризацией и апертурой светового пятна в зоне АО взаимодействия $d = 0.6$ мм (расходимость луча порядка 2 мрад). Центральная частота звука в АО модуляторе была равна $f_0 = 34$ МГц. Частота модулирующей функции F менялась от нуля до 2 МГц, а величина девиации — до 3 МГц.

На рис. 3 приведена осциллограмма сигнала с фотоприемника в отсутствие модуляции. Здесь и далее одна большая клетка экрана по горизонтали соответствует 1.4 мрад. Мощность акустической волны во всех экспериментах была постоянной и обеспечивала эффективность дифракции без модуляции не менее 95%.

При низких частотах модулирующей функции, когда $T > d$, происходит хорошо известное в АО сканирование брэгговского луча вокруг центрального положения с частотой F [3]. Увеличение величины F приводит к уменьшению амплитуды сканирования, и при достижении величины F_k , соответствующей равенству $T = d$ (в нашем случае $F_k \approx 1$ МГц), сканирование прекращается. С повышением частоты F выше этого значения наблюдается появление двух боковых дифракционных порядков вокруг центрального луча, интенсивность которых пропорциональна индексу частотной модуляции. Эту ситуацию демонстрирует рис. 4, полученный при $F = 1.1$ МГц и индексе модуляции $M = 1.5$. Видно расщепление луча на дополнительных два, причем наблюдается интерференционная картина на частоте F между максимумами центрального и боковых дифракционных порядков (в силу их пересечения).

По достижении значения F_d боковые лучи вырождаются в самостоятельные, отдельно отстоящие дифракционные порядки (в условиях эксперимента: $F_d \approx 1.4$ МГц), интерференционная картина исчезает. Рис. 5 показывает осциллограмму сигнала с фотоприемника при частоте $F = 2$ МГц (что соответствует $T = d/2 = 0.3$ мм). При этом на световом пятне „укладывалось“ около двух периодов модулирующей функции. Показательно, что если сложить интенсивности трех образовавшихся лучей, то их суммарная интенсивность составит примерно 90% от интенсивности луча без модуляции. Следовательно, практически вся световая энергия отклоняется в эти три дифракционных максимума. Дальнейшее повышение величины M приводит к подавлению основного дифракционного порядка и образованию дополнительных лучей.

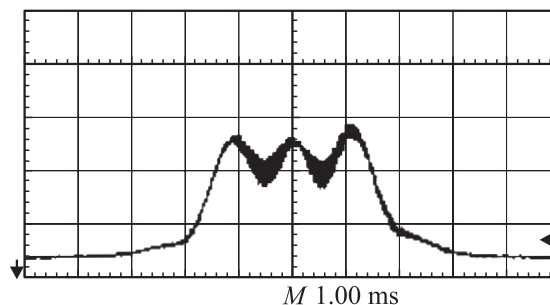


Рис. 4. Дифрагированное поле при $F = 1.1$ МГц, $\Delta f_m = 1.65$ МГц и $M = 1.5$.

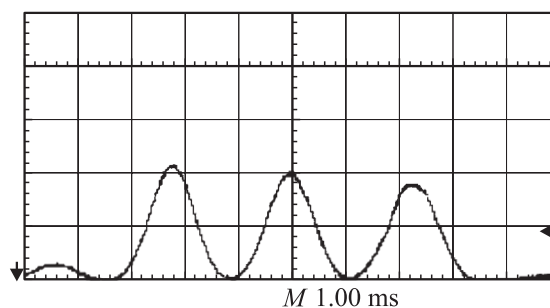


Рис. 5. Дифрагированное поле при $F = 1.1$ МГц, $\Delta f_m = 1.65$ МГц и $M = 1.5$.

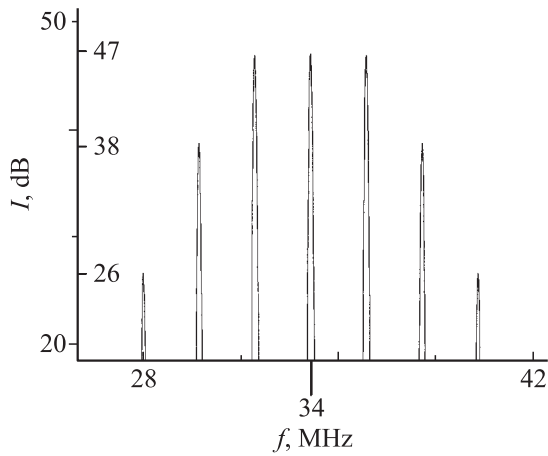


Рис. 6. Расчетный спектр электрического сигнала.

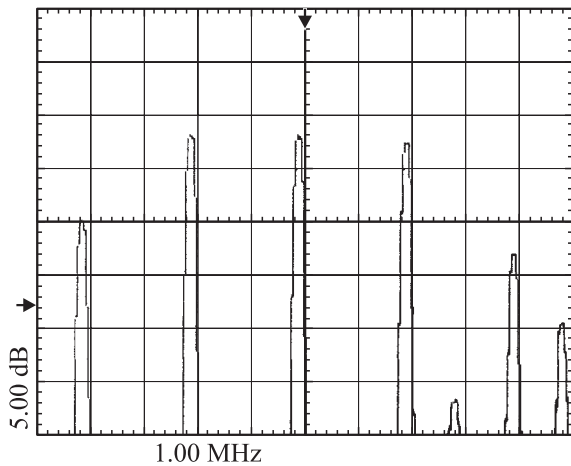


Рис. 7. Спектр сигнала, подводимого к пьезопреобразователю. Большая клетка по горизонтали соответствует 1 МГц, по вертикали — 5 дБ.

Для интерпретации наблюдаемой картины рассмотрим частотные спектры частотно-модулированного сигнала, соответствующие (1). При малых индексах модуляции спектр такого сигнала мало отличается от спектра амплитудно-модулированного сигнала и состоит из центральной компоненты большой интенсивности и двух боковых малой интенсивности. Специфические особенности возникают при значениях M , близких и более 1. На рис. 5 приведен расчетный спектр, соответствующий сигналу для рис. 5. Здесь I — относительная интенсивность спектральных компонент, f — частота. Видно, что расстояние между компонентами равно частоте модулирующей функции $F = 2$ МГц, причем, интенсивности двух первых боковых компонент равны интенсивности центральной компоненты (на частоте $f = 34$ МГц), а следующие (на частотах 30 и 38 МГц) подавлены на 9 дБ. Рис. 7 показывает спектр сигнала данной экспериментальной ситуации, измеренный с помощью анализатора спектра. Видно достаточно хорошее соответствие расчета и измерений.

Таким образом, быстрое и неоднократное по световой апертуре изменение частоты звука приводит к

появлению дифракционных порядков, соответствующих спектральным компонентам звуковой волны. Важно, что эти дифракционные порядки имеют постоянную амплитуду, их суммарная мощность примерно равна мощности основного порядка (без модуляции), а количество возникающих лучей определяется глубиной частотной модуляции (индексом модуляции).

Примечательно отсутствие существенных эффектов интермодуляции. Так, в экспериментальных условиях, соответствующих рис. 5 (максимальная эффективность трех, отдельных дифракционных лучей), интенсивность максимумов, возникающих вблизи нулевого порядка, не превышала 3–5% от суммарной интенсивности дифракционных максимумов.

Формулируя выводы работы, можно сказать, что в условиях, когда $T < d$, происходит расщепление дифрагированного луча на несколько, причем угловое расстояние между ними $\Delta\alpha$ определяется очевидным соотношением

$$\sin \Delta\alpha = \lambda F / v. \quad (2)$$

Используя (2) и то, что полная расходимость лазерного луча дается выражением $\Delta\Theta = 4\lambda / \pi d$, запишем значение величины модулирующей функции, при которой возникающие боковые лучи полностью разделились с первоначальным лучом (с учетом малости углов)

$$F_d = 4v / \pi d. \quad (3)$$

Отметим, что экспериментально зафиксированная величина $F_d = 1.4$ МГц, хорошо соответствует расчетному значению.

Обнаруженный эффект, с одной стороны, безусловно, полезен при практических применениях и, по мнению автора, может представлять интерес для теоретиков в плане как более глубокого изучения, так и для оптимизации к различным применениям. При этом надо учитывать тот факт, что получить точное аналитическое выражение, описывающее данный режим АО взаимодействия (с учетом большой эффективности дифракции), весьма сложно.

АО модуляторы на базе описанного взаимодействия использовались в лазерных системах записи изображений для изготовления флексографических форм, фотошаблонов, лазерной маркировки (НПЦ „Альфа“, Москва, <http://www.alphalaser.ru>).

Автор выражает признательность В.И. Миргородскому за помощь в математическом моделировании спектров сигналов.

Список литературы

- [1] Антонов С.Н., Миргородский В.И. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 84–86.
- [2] Hecht D. // IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. 1977. Vol. SU-24. N 1. P. 7–18.
- [3] Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применения. М., 1978. 112 с.