

01;07;08;12

## Повышение эффективности акустооптического модулятора с двухлучевой диаграммой направленности методом коррекции двухчастотного электрического сигнала

© С.Н. Антонов,<sup>1</sup> В.В. Проклов,<sup>1</sup> Ю.Г. Резвов,<sup>2</sup> Л.Н. Чесноков,<sup>1</sup> В.Н. Чесноков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники РАН,  
141190 Фрязино, Московская область, Россия  
e-mail: proklov@mail.cplire.ru

<sup>2</sup> Новомосковский институт Российского химико-технологического университета,  
301650 Новомосковск, Тульская область, Россия  
e-mail: rezvov@newmsk.tula.net

(Поступило в Редакцию 1 марта 2005 г.)

Впервые теоретически исследована возможность формирования эффективной двухлучевой диаграммы направленности при брэгговской акустооптической дифракции. Показано, что увеличение эффективности дифракции в основные лучи возможно при подмешивании к двухчастотному сигналу дополнительных спектральных составляющих, соответствующих ближайшим комбинационным частотам. Подмешивание дополнительного сигнала осуществлено в рамках оригинальной радиотехнической системы полиномиальной нелинейной коррекции управляющего сигнала. Проведено экспериментальное исследование брэгговской дифракции на скорректированном сигнале в высокоэффективном модуляторе из парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ). Получено удовлетворительное согласие с теорией и достигнуты перспективные для практики результаты. В частности, совокупная максимальная эффективность дифракции в два основных луча повышена с 68 до 79%.

PACS: 78.20.Nr, 07.60.-j

### Введение

В известных системах термической записи изображений на поверхности твердых тел с использованием линейно поляризованного и/или неполяризованного излучения мощных технологических лазеров существует потребность в многолучевом режиме. Он заключается в формировании нескольких близко расположенных лучей с одинаковой максимально возможной мощностью, высоким контрастом модуляции и слабым окружающим фоном.

Распространенные в настоящее время технические решения на базе акустооптических модуляторов (АОМ), к сожалению, хорошо обеспечивают лишь однолучевой режим [1]. Связано это с тем, что при подаче на вход АОМ многочастотного сигнала принципиальная нелинейность акустооптического (АО) взаимодействия приводит к возникновению многочисленных „ложных лучей“, обусловленных интермодуляционными искажениями. В простейшем практически важном случае двухчастотной модуляции эффективность дифракции в каждый из двух основных лучей не превышает  $\sim 34\%$  даже в брэгговском режиме [2]. В этом случае основные потери мощности происходят из-за возникновения двух „ложных“ лучей, соответствующих двухтоновым интермодуляционным искажениям третьего порядка.

В последнее время получены новые результаты, основанные на нелинейной коррекции входного электрического сигнала [3,4], что приводит к улучшению характеристик АО взаимодействия, важных в данном конкретном случае. Можно предположить, что коррекция

электрического сигнала способна уменьшить потери мощности при формировании многолучевого режима.

В настоящей работе впервые теоретически и экспериментально исследуется возможность улучшения характеристик брэгговского двухчастотного АОМ на основе нелинейной коррекции двухчастотного управляющего сигнала.

### Теоретическая часть

Пусть на пьезопреобразователь АОМ подается квазигармонический сигнал вида  $s(t) = A \operatorname{Re}\{a(t) \exp(j\omega_B t)\}$ , где  $a(t)$  — комплексная функция модуляции, такая что  $|a| \leq 1$ ;  $\omega_B$  — циклическая частота звука, соответствующая условию синхронизма в условиях брэгговского режима дифракции. Предположим для упрощения, что пьезопреобразователь не вносит амплитудно-фазовых искажений. Если пренебречь дисперсией скорости звука, то распределение амплитуды возбуждаемой акустической волны (распространяющейся вдоль оси  $x$ ) определяется функцией  $a(t, x) = a(t - x/v_s)$ , где  $v_s$  — скорость звука.

Пусть монохроматический световой пучок падает на ячейку под углом брэгговского синхронизма в плоскости дифракции  $xz$ . Обозначим распределение комплексной амплитуды этого пучка  $E_i(x, y, z)$ .

Известно, что при малой ширине углового спектра падающего света спектр дифрагированного света почти точно передает спектральный состав звуковых колебаний (в условиях слабого взаимодействия). Иначе это условие можно написать в виде  $l \operatorname{tg} \varphi_{i,d} \ll d$ , где

$l$  — длина взаимодействия,  $\varphi_{i,d}$  — углы падения и дифракции,  $d$  — поперечный размер пучка света в плоскости дифракции. В этом случае эволюция комплексных амплитуд проходящего  $E_i(x, y, z, t)$  и дифрагированного  $E_d(x, y, z, t)$  световых пучков в возмущенном звуком слое определяется системой двух связанных уравнений [5]:

$$\frac{dE_d(x, y, z, t)}{dz} = \frac{v}{2l} a(t, x) E_i(x, y, z, t),$$

$$\frac{dE_i(x, y, z, t)}{dz} = -\frac{v}{2l} a^*(t, x) E_d(x, y, z, t),$$

где  $v$  — индекс фазовой модуляции, рассчитанный для несущей волны в тех точках, где  $|a(t, x)| = 1$ ;  $a^*(t, x)$  — комплексно-сопряженное выражение.

На выходе из области взаимодействия ( $z = l$ ) комплексные амплитуды световых пучков можно найти методом последовательных приближений

$$E_d(x, y, l, t) = \left( \frac{v}{2} a(\tau) - \frac{1}{6} \left( \frac{v}{2} \right)^3 a(\tau) |a(\tau)|^2 + \frac{1}{120} \left( \frac{v}{2} \right)^5 a(\tau) |a(\tau)|^4 + \dots \right) E_i(x, y, 0),$$

$$E_i(x, y, l, t) = \left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{v}{2} \right)^2 |a(\tau)|^2 + \frac{1}{24} \left( \frac{v}{2} \right)^4 |a(\tau)|^4 + \dots \right) E_i(x, y, 0), \quad \tau = t - \frac{x}{v_s}. \quad (1)$$

Из (1) видно, что в случае  $|a(t)| = 1$  соотношения упрощаются

$$E_d(x, y, l, t) = a(\tau) \sin(v/2) E_i(x, y, 0),$$

$$E_i(x, y, l, t) = \cos(v/2) E_i(x, y, 0). \quad (2)$$

В данных условиях возможны 100%-ная эффективность дифракции при  $v = \pi$  и точное преобразование спектра электрического сигнала в пространственный спектр дифрагированного света (в пределах полосы АО взаимодействия). Можно отметить, что наиболее общий случай реализации условия  $|a(t)| = 1$  — это дифракция на акустической волне с фазовой модуляцией.

Из (1) видно, что при отступлении от условия  $|a(t)| = 1$  предельно достижимая эффективность дифракции будет уменьшаться. Пространственный спектр дифрагированного света только при слабом взаимодействии отображает спектр акустического сигнала. Увеличение индекса модуляции приводит к искажению спектра, которое тем больше, чем сильнее отступление от указанного условия. Обогащение пространственного спектра дифрагированного света компонентами, которые отсутствуют в акустическом сигнале, вызвано интермодуляционными искажениями.

Эти соображения показывают влияние формы модулирующей функции квазигармонического сигнала на

характер дифракции. Чем ближе параметры модулирующей функции к условию  $|a(t)| = \text{const}$ , тем выше предельная эффективность дифракции в дифрагированный свет и тем меньше нелинейные искажения при одинаковом уровне эффективности. В этом смысле случай  $|a(t)| = \text{const}$  наиболее близок к дифракции на монохроматическом сигнале ( $a(t) = 1$ ), при котором выполняются отмеченные особенности.

Пусть  $Y_a = (1/T) \int_0^T |a(t)|^2 dt$  — среднее значение функции  $|a(t)|^2$  за период модулирующей функции  $T$  (или за время прохождения звука через световое пятно). Среднеквадратичное отклонение функции  $|a(t)|^2$  от константы характеризует выражение  $D = (1/T) \int_0^T (|a(t)|^2/Y_a - 1)^2 dt$ , что дает количественную меру близости к условию  $|a(t)| = \text{const}$ . Если параметр  $d$  содержит величины, доступные для измерения, то можно управлять предельно достижимой эффективностью дифракции и уровнем интермодуляционных искажений. Необходимым условием минимума параметра  $D$  является система

$$\frac{\partial D}{\partial \varphi_i} = 0, \quad (3)$$

где  $\varphi_i$  — варьируемые параметры.

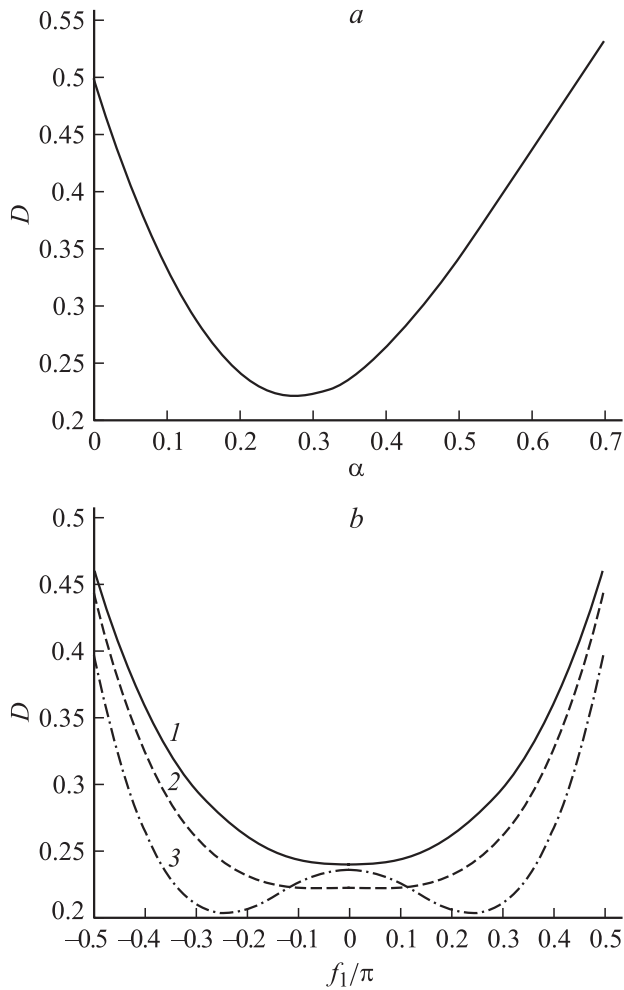
Можно предположить, что определенная амплитудно-фазовая коррекция входного сигнала способна улучшить характеристики АО взаимодействия, существенные в данном случае. Эта коррекция должна уменьшать значение  $D$ , что означает приближение к „идеальному условию“  $|a(t)| = \text{const}$ .

Если сигнал содержит две равных по амплитуде и близких по частоте ( $\omega_{1,2}$ , причем  $|\omega_1 - \omega_2| \ll \omega_{1,2}$ ) компоненты сигнала, то можно написать  $a(t) \sim \exp(j\Omega t) + \exp(-j\Omega t) \sim \cos(\Omega t)$ , где  $\Omega = (\omega_1 - \omega_2)/2$ . Это эквивалентно случаю амплитудной модуляции по гармоническому закону. Если обозначить индекс фазовой модуляции, измеренный только на одной из частот  $\omega_{1,2}$  через  $v_0$ , то в данном случае  $v = 2v_0$ . Дифрагированный свет будет состоять из двух основных лучей, а также лучей, соответствующих комбинационным частотам. Из последних обычно наиболее заметны интермодуляционные искажения 3-го порядка. Эти лучи создают ложные отклики на звуковых частотах  $2\omega_1 - \omega_2$  и  $2\omega_2 - \omega_1$ . В рассмотренном случае расчет дает  $D = 1/2$  независимо от фаз сигналов.

Предположим, что к двухчастотному сигналу подмешиваются еще две компоненты равных амплитуд с частотами, точно соответствующими указанным искажениям 3-го порядка. Тогда

$$a(t) \sim \cos(\Omega t) + (\alpha/2)(\exp(3j\Omega t + jF_1) + \exp(-3j\Omega t + jF_2)),$$

где  $\alpha$  — относительные амплитуды подмешиваемых компонент,  $F_{1,2}$  — их фазы.



**Рис. 1.** Зависимость параметров  $D$  от  $\alpha$  при  $f_1 = 0, f_2 = \pi$  (а) и от  $f_1$  при  $f_2 = \pi, \alpha = 0.2$  (1),  $0.25$  (2),  $0.35$  (3) (б).

Это выражение удобно переписать в виде  $a(t) \sim \cos(\Omega t) + \alpha \exp(jf_1) \cos(3\Omega t + f_2)$ , где  $f_1 = (F_1 + F_2)/2$ ,  $f_2 = (F_1 - F_2)/2$ . Применение изложенной методики дает

$$D = (1 + 4\alpha \cos f_2 \cos f_1 + 8\alpha^2 \cos^2 f_1 + \alpha^4)/2(1 + \alpha^2)^2. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) вместе с использованием условия (3) дает следующие результаты. При малой мощности подмешиваемого сигнала ( $\alpha \ll 1$ ) минимум достигается при условии  $\cos f_1 \cos f_2 = -1$ , т. е., например, при  $F_1 = F_2 = \pi$ . Это фазовое условие сохранения вплоть до значения  $\alpha \cong 0.250$ , при превышении которого значениям  $F_1 = F_2 = \pi$  соответствует локальный максимум при вариации фаз. Можно отметить, что при небольших отступлениях от этого условия минимумы всегда достигаются при  $f_2 = \pi$ . Если это значение фиксировано, то при  $\alpha > 0.250$  значению  $f_1 = 0$  соответствует локальный фазовый максимум, а при небольшом отклонении от этого условия наблюдаются локальные минимумы. Если фиксированы значения фаз  $f_1 = 0, f_2 = \pi$ , то параметр  $D$  уменьшается вплоть до  $\alpha = 0.278$ , дости-

гая значения  $D = 0.221$ . При дальнейшем увеличении мощности подмешиваемого сигнала параметр  $D$  растет. Рис. 1 иллюстрирует приведенные особенности и характерное поведение параметра  $D$ . Наименьшее значение параметра  $D$  достигается при  $\alpha = 0.6-0.8$ , когда при соответствующем подборе фаз почти 90% падающего света отклоняется в совокупность лучей, образующих дифракционный порядок. Этот анализ показывает, что хорошая совокупная эффективность дифракции наблюдается в широком интервале значений варьируемых параметров. В частности, в диапазоне  $\alpha = 0.2-0.35$  в широком интервале значений  $f_1$  параметр  $D$  меняется слабо.

Теперь можно предположить, что формирование двухлучевой диаграммы будет эффективно происходить вблизи диапазона параметров, соответствующих минимальным значениям параметра  $D$ . Фиксируем значения  $f_1 = 0, f_2 = \pi$ , тогда функция модуляции примет вид

$$a(t) \sim \cos(\Omega t) - \alpha \cos(3\Omega t). \quad (5)$$

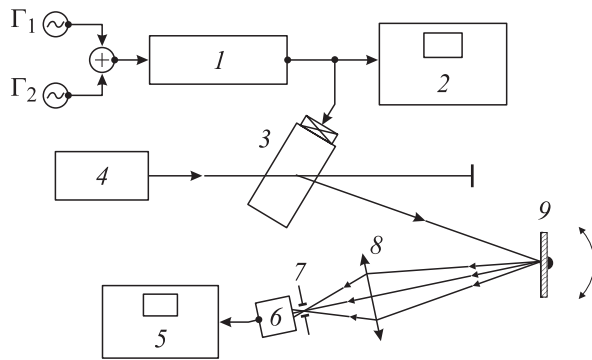
Подставим (5) в (1) с использованием достаточного количества слагаемых, проведем тригонометрические преобразования, после чего выделим слагаемое, пропорциональное  $\cos(\tau)$ . Это слагаемое даст равные по модулю амплитуды двух основных лучей. Аналитическое исследование показывает, что при коррекции вида (5) наибольшая эффективность дифракции в основные два порядка наступает при  $\alpha \cong 0.256$  и составляет 38.3% в каждый из лучей. Вообще в интервале значений  $\alpha$  от 0.19 до 0.32 указанная интенсивность не менее 38%, что говорит о допустимости заметных вариаций этого параметра.

Важно отметить, что при коррекции по закону (5) изменится соотношение между  $v$  и  $v_0$ . В частности, при  $\alpha = 0.256$  будет  $v = 1.79v_0$ .

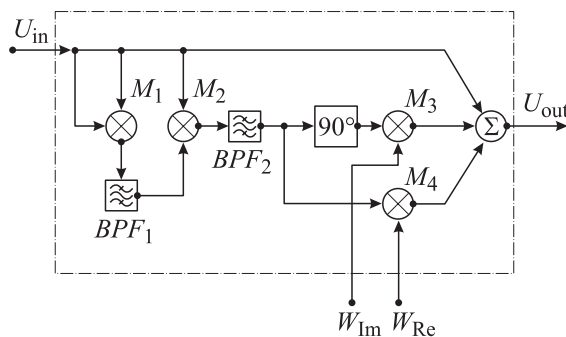
## Экспериментальная часть

Методика эксперимента. Экспериментальное исследование формирования двухлучевой диаграммы направленности с максимальной возможной дифракционной эффективностью осуществлялось в брэгговском режиме на экспериментальной установке, блок-схема которой приведена на рис. 2. Установка включает в себя два независимых ВЧ генератора, синтезатор предискажений, анализатор радиочастотного спектра сигналов на входе АО ячейки (АОЯ), одномодовый He-Ne лазер (длина волны излучения  $\lambda_0 = 0.63 \mu\text{m}$ ), устройство отклонения (сканирования) дифрагированного света, фотоприемник и осциллограф (вместо него иногда используется блок аналого-цифрового преобразования, сопряженный с персональным компьютером).

В качестве акустооптического материала использовался монокристалл парателлуриата  $\text{TeO}_2$ , в котором медленная сдвиговая волна, возбуждаемая с помощью пьезопреобразователя, распространялась в плоскости



**Рис. 2.** Блок-схема экспериментальной установки: 1 — синтезатор предсказаний, 2 — спектроанализатор, 3 — АОЯ, 4 — лазер, 5 — осциллограф, 6 — ФД, 7 — диафрагма, 8 — линза, 9 — зеркало.



**Рис. 3.** Схема синтезатора.

(001) под малым углом  $\beta \cong 6^\circ$  к кристаллографическому направлению [110]. Скорость звука в данном направлении  $v_s = 650$  м/с. Свет распространялся вблизи оси [001] под брегговским углом к акустической волне и был линейно поляризован в плоскости дифракции. Диапазон перестройки рабочих частот для каждого из двух входных сигналов составил 45–52 МГц.

Для нелинейной коррекции входного сигнала использовался оригинальный электронный синтезатор, схема которого представлена на рис. 3. Согласно схеме, сигнал  $U_{in}$  от двух ВЧ генераторов (на двух различных частотах  $f_{1,2}$ , но с одинаковой перестраиваемой амплитудой) подается на аналоговый умножитель  $M_1$ , где умножается сам на себя, затем полученный сигнал  $X^2$  поступает на полосно-пропускающий фильтр  $BPF_1$  и затем на  $M_2$ , где еще раз перемножается с  $X$ . В результате формируется сигнал  $X^3$ , представляющий собой сумму всех продуктов 3-й степени от входных сигналов ( $3f_{1,2}$ ,  $2f_1 \pm f_2$ ,  $2f_2 \pm f_1$ ). Из этой суммы полосовой фильтр  $BPF_2$  выделяет сигналы с частотами  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$ , которые затем поступают на разветвитель. В одном плече разветвителя установлен фазовый фильтр первого порядка, поворачивающий фазы всех сигналов на  $90^\circ$ , и регулируемый перемножитель  $M_3$ , а в другом — только регулируемый перемножитель  $M_4$ . Варьируемые с помощью управляющих напряжений  $W_{Im}$  и  $W_{Re}$  амплитуды

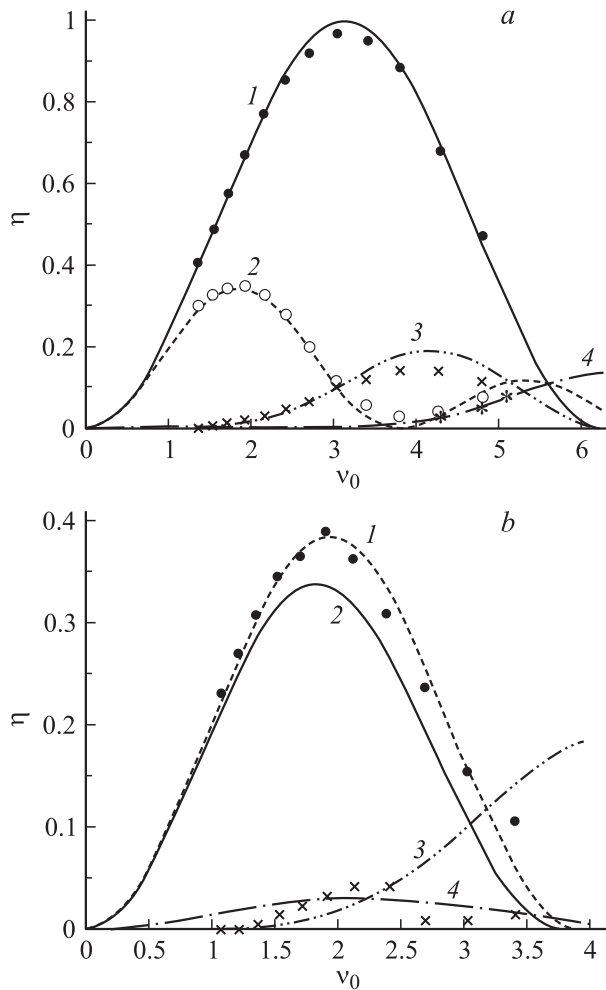
сигналов в этих каналах при последующем сложении в нужной пропорции делают возможным подбор любой фазы и амплитуды для сигналов с частотами  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$ . Далее полученный сигнал коррекции суммируется с основным сигналом  $X$  и поступает на выход синтезатора  $U_{out}$  и далее через усилитель мощности на вход акустооптической ячейки. Как видно из схемы синтезатора, фаза синтезируемых интермодуляций 3-го порядка не зависит от амплитуды входного сигнала, а амплитуда зависит кубично.

Основные измеряемые величины — дифракционная эффективность  $\eta$  и индекс фазовой модуляции для каждого из двух сигналов  $v_0$  калибровались несколькими методами. Так, для определения величины дифракционной эффективности основного луча первого порядка  $\eta_1$  использовалась следующая процедура. Излучение лазера с помощью электромеханического прерывателя подвергалось амплитудной модуляции с частотой  $\sim 2$  кГц. На осциллографе последовательно измерялись отклики при фиксированных положениях поворотного зеркала сканирующего устройства: сначала при попадании в фотоприемник проходящего света (нулевой порядок в отсутствие звука), а затем в максимуме первого порядка (при включенном непрерывном звуке). Значение определялось как отношение амплитуд второго отклика к первому. Заметим, что дополнительные проверки спектральных и динамических характеристик приемного тракта показали корректность данного метода калибровки измерений. Для дополнительного контроля измерялась величина „обеднения“ света в нулевом порядке при дифракции на одном монохроматическом сигнале с максимумом дифракционной эффективности. Результаты основной и дополнительной методик находились в удовлетворительном согласии.

Калибровка значений  $v_0$  осуществлялась путем аппроксимации экспериментальной зависимости дифракционной эффективности для монохроматического сигнала от его амплитуды на входе законом  $\eta_1 \sim \sin^2(v_0/2)$ . В условиях эксперимента значение параметра Кляйна–Кука составляло  $Q \cong 50$ , поэтому имеет место брегговский режим дифракции. В этом случае максимальное значение эффективности при дифракции на монохроматическом сигнале достигается при  $v_0 = \pi$ .

Апертура лазерного луча на входе АОЯ в плоскости дифракции составляла 6 мм, что обеспечивало величину спектрального разрешения по критерию Рэля  $\sim 100$  кГц.

Основные экспериментальные результаты и сравнение с расчетами. На рис. 4, а представлены результаты измерений дифракционной эффективности в нескольких случаях. В случае дифракции на монохроматическом сигнале с частотой  $f_1$  приведена зависимость  $\eta_1(v_0)$ . В случае дифракции на двух сигналах равной амплитуды с частотами  $f_1 = 47.136$  и  $47.363$  МГц приведены зависимости эффективности основных лучей на каждой из этих частот  $\eta_{1,2}(v_0)$ , а также эффективность дифракции в лучи, определяемые



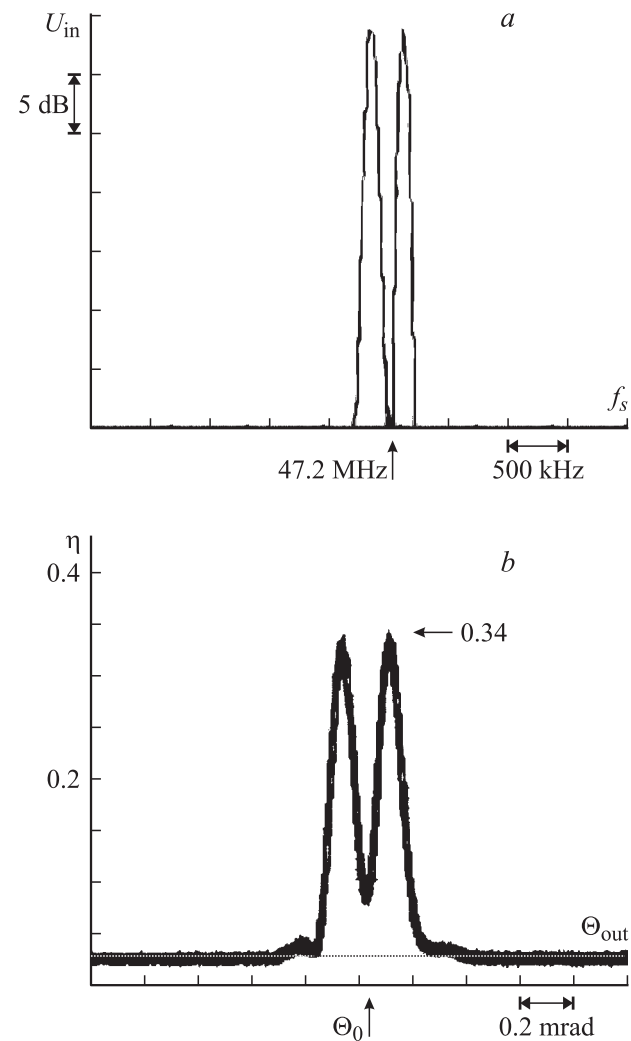
**Рис. 4.** Сравнение теоретических и экспериментальных результатов зависимостей дифракционной эффективности от индекса фазовой модуляции от одночастотного или двух равных одночастотных входных сигналов. Кривые — теория, значки — эксперимент. *a* — эффективность дифракции на одночастотном сигнале (1), интенсивность одного из основных лучей (2), интермодуляционных лучей 3- (3) и 5-го (4) порядков при дифракции на двухчастотном сигнале; *b* — эффективность дифракции в один из основных лучей (1, 2) и один из интермодуляционных лучей 3-го порядка (3, 4) при дифракции на некорректированном (2, 4) и корректированном (1, 3) двухчастотных сигналах.

интермодуляционными искажениями. Эти лучи соответствуют отклику на частотах  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$  (интермодуляционные искажения 3-го порядка) и на частотах  $3f_1 - 2f_2$  и  $3f_2 - 2f_1$  (5-го порядка). Видно, что экспериментальные значки по большей части находятся в удовлетворительном согласии с достаточно сложными теоретическими зависимостями. При этом подтверждаются ранее известные ключевые особенности акустооптической дифракции в рассматриваемых условиях. В одночастотном случае это зависимость  $\eta_1 \sim \sin^2(v_0/2)$  с максимальным значением эффективности, близким к 100% (в эксперименте достигнуто значение 96%) при  $v_0 = \pi$ . При дифракции на двухчастотном сигнале это —

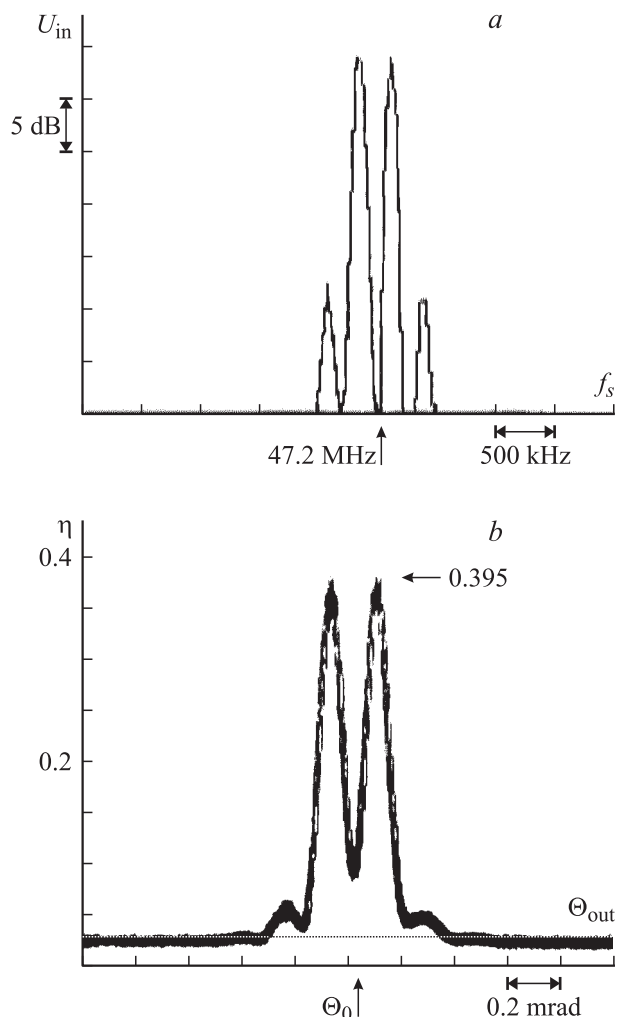
ограничение эффективности в каждый из основных лучей на уровне не более 34%, достигаемом при  $v_0 = 1.84$ .

В результате экспериментов на двухчастотном некорректированном сигнале получены новые результаты, интересные для практики. Например, при  $v_0 = 3.05$  сравниваются на выходе АОЯ интенсивности двух основных максимумов 1-го порядка и двух интермодуляционных 3-го порядка. В результате возникает 4 равноотстоящих одинаковых луча с эффективностью дифракции в каждый  $\eta \cong 0.10$ . Экспериментально наблюдалось также существование при  $v_0 \cong 4.2$  достаточно мощного интермодуляционного луча 3-го порядка ( $\eta \cong 0.15$ , теория предсказывает  $\eta \cong 0.19$ ).

На рис. 4, *b* приведены аналогичные зависимости для основных порядков и интермодуляционных 3-го порядка для сравнения дифракции на некорректированном и корректированном двухчастотных сигналах. Коррекция проводилась для достижения максимальной эффективности в двух основных лучах. При этом параметры



**Рис. 5.** Осциллограммы (спектры) амплитуд входных электрических сигналов (*a*) и интенсивности оптических пространственных спектров (*b*) в условиях двухчастотного сигнала без коррекции.



**Рис. 6.** Осциллограммы (спектры) амплитуд входных электрических сигналов (*a*) и интенсивности оптических пространственных спектров (*b*) с коррекцией.

вида коррекции (5) по возможности выбирались около значений  $\alpha \cong 0.26$ ,  $F_1 = F_2 = \pi$ , установленных при теоретическом исследовании.

На рис. 5 приведены осциллограммы спектров электрических сигналов  $U_{in}$ , измеренных на пьезопреобразователе (5, *a*), и как результат дифракционных эффективностей для выходных оптических пространственных спектров  $\eta$  как функция выходного угла  $\Theta_{out}$  (5, *b*) в условиях отсутствия коррекции. Центральное значение угла  $\Theta_0$  соответствует положению дифрагированного луча при одночастотном электрическом сигнале  $f_s = 47.2$  MHz.

Рис. 6, *a* и 6, *b* показывают аналогичные зависимости при введении коррекции по критерию достижения максимальной эффективности основных лучей. Все масштабы соответствующих рисунков одинаковы.

Экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии с теоретическими расчетами. Таким образом, убедительно показана возможность использования предварительной коррекции двухчастотного

сигнала для эффективного формирования двухлучевой диаграммы направленности. При этом суммарная эффективность дифракции в два основных порядка повышается от известного значения 68 до 79%. Полученный результат практически важен в задаче расщепления излучения мощного технологического лазера, что используется в системах термической записи изображений.

## Заключение

1. Предложена простая методика оценки предельно достижимой совокупной эффективности при многочастотной брэгговской дифракции света. Методика использует параметры комплексного акустического (входного электрического) сигнала. В рамках методики предсказано увеличение эффективности дифракции в основные порядки при коррекции указанного типа.

2. Предложена оригинальная радиотехническая схема (синтезатор) для реализации разных видов нелинейной коррекции входного сигнала. В данной работе использование синтезатора помогает формировать двухлучевую диаграмму направленности и уменьшать потери мощности в проходящий свет.

3. Обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования коррекции двухчастотного сигнала при АО формировании двухлучевой диаграммы направленности лазерного излучения. В результате совокупная максимальная эффективность дифракции в два основных луча повышена с 68 до 79%, что эквивалентно возрастанию КПД на 14%.

4. Решенная задача является примером использования полиномиальной нелинейной коррекции входного электрического сигнала для улучшения важнейших характеристик АО устройств.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 03-02-16754а).

## Список литературы

- [1] Антонов С.Н., Миргородский В.И. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 84–86.
- [2] Hecht D. // IEEE Transactions on sonics and ultrasonics. 1977. Vol. SU-24. N 1. P. 7–18.
- [3] Proklov V., Rezvov Y., Chesnokov L. et al. // Abstracts 2003 IEEE Intern. Ultrason. Symp. Honolulu, 2003. P. 223–224.
- [4] Проклов В.В., Резвов Ю.Г., Чесноков В.Н. и др. // РиЭ. 2004. Т. 49. № 4. С. 493–498.
- [5] Корнел А. Акустооптика. Пер. с англ. // М.: Мир, 1993. 240 с.