

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИФРАКЦИИ

© 2020 г. С. Н. Антонов^{а,*}, Ю. Г. Резвов^{б,**}

^а Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

^б Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева
Россия, 301665, Новомосковск Тульской обл., ул. Дружбы, 8

*e-mail: olga-ant@yandex.ru

**e-mail: rezvovyug@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.

После доработки 30.04.2020 г.

Принята к публикации 04.05.2020 г.

Рассмотрена многолучевая акустооптическая брэгговская дифракция лазерного излучения — деление исходного луча на несколько независимо управляемых лучей (каналов) без принципиальных потерь световой мощности. Получены практически значимые соотношения, определяющие условия реализации многолучевой дифракции и ее основные параметры. Показано, что необходимым условием является вид управляющего радиосигнала, близкий к частотно(фазово)-модулированному. Экспериментальные исследования проведены на поляризационно-нечувствительном акустооптическом дефлекторе на кристалле парателлуриата. Показаны практические применения многолучевой дифракции: лазерное нанесение изображений, многоканальная передача (переключения) оптической информации, формирование профиля лазерного луча.

DOI: 10.31857/S0032816220050262

1. ВВЕДЕНИЕ

Прикладная акустооптика (а.о.) — это управление параметрами оптического излучения ультразвуковыми волнами, распространяющимися в прозрачных средах [1–8]. Практически значимый оптический диапазон излучения простирается от ультрафиолета до десятков микрометров, акустический — от единиц до сотен мегагерц. Хорошо изучено использование а.о. в анализаторах радиосигналов, приборах спектральной обработки оптических изображений, в оптических процессорах и др. Принципиальными особенностями а.о.-приборов являются: возможность управления интенсивным (десятки и сотни киловатт на квадратный сантиметр) лазерным излучением, высокое быстродействие (до десятков наносекунд), отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери (единицы процентов), небольшие габариты и вес.

Развитие лазерных источников определяет и совершенствование методов управления параметрами излучения: интенсивностью лазерного луча (модуляторы) и его угловым положением (дефлекторы). Акустооптические модуляторы используются для модуляции добротности лазеров,

внешней модуляции излучения, а.о.-дефлекторы (а.о.д.) предназначены для сканирования лазерного луча в системах обработки материалов и лазерного вывода изображений.

Основным материалом современных а.о.-приборов является монокристалл парателлуриата (TeO_2). Кристалл обладает феноменально большой величиной а.о.-качества — $M_2 = 1000 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$ (при дифракции света на медленной сдвиговой акустической моде); широким диапазоном прозрачности, от 0.35 до 5 мкм; высокой лучевой стойкостью; развитой технологией производства больших (со стороной более 20 мм) однородных кристаллов [9]. Теория а.о. на кристалле TeO_2 и ряд важных реализаций изучены и описаны весьма полно в работах [1, 2, 10–13].

Целью настоящей работы является рассмотрение а.о.-метода деления лазерного луча на несколько независимо управляемых лучей (каналов) без принципиальных потерь световой мощности. В теоретической части работы сообщается о принципах многолучевой а.о.-дифракции и делении луча с ее помощью, в практической — сделан обзор некоторых применений метода.

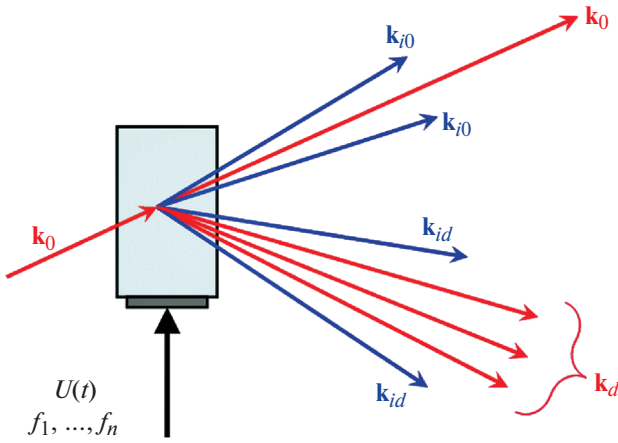


Рис. 1. Основные k_d и интермодуляционные k_{id} дифракционные лучи при подаче многочастотного акустического сигнала $U(t)$.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

2.1. Принцип многолучевой дифракции

Фотоупругий эффект (основа а.о.) в большинстве сред при рабочих интенсивностях звуковых волн линеен. Однако мощность дифракционных порядков от входной акустической мощности при дифракции на одночастотном акустическом сигнале зависит нелинейно [6]. В случае многочастотного сигнала, помимо основных дифракционных порядков, соответствующих акустическим частотам, в общем случае появляются интермодуляционные порядки [14–18]. Например, если сигнал состоит из частот f_1, f_2, f_3 , то появятся дополнительные интермодуляционные дифракционные порядки, соответствующие комбинационным частотам: $2f_1 - f_2, 2f_1 + f_2 - 2f_3$ и т.д. Кроме того, мощность каждого из основных порядков нелинейным образом зависит от мощности соответствующей ему компоненты входного сигнала. Таким образом, при эффективности дифракции более 40% дифракционное поле является сложной функцией амплитуд и фаз всех частотных компонент сигнала (рис. 1).

Исходное излучение k_0 под воздействием звукового поля, образованного сигналом $U(t)$, создает световое поле:

– набор основных лучей k_d , каждый из которых соответствует генерируемым частотам f_1, \dots, f_n ;

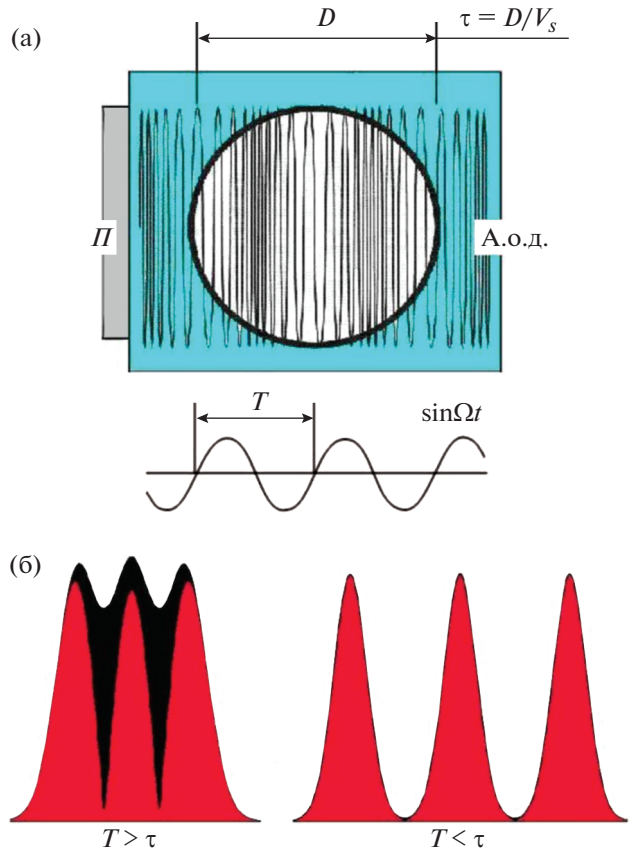


Рис. 2. Иллюстрация условия разделения лучей на примере трех радиочастот: а – П – пьезопреобразователь, D – апертура светового луча, V_s и T – соответственно скорость и период модуляции звуковой волны, τ – время прохода звуковой волны через световую апертуру; б – угловая картина дифракционного поля: слева – лучи перекрываются с образованием областей интерференции, справа – лучи разделены.

– набор интермодуляционных порядков k_{id} в поле основных дифракционных лучей и k_{j0} вблизи нулевого порядка.

Физический принцип, позволяющий подавлять интермодуляционные эффекты и формировать высокоэффективное многолучевое а.о.-поле, состоит в том, что акустическая волна подвергается угловой (частотной, фазовой) модуляции [19, 20]. В результате исчезают интермодуляционные лучи, и распределение световой мощности по дифрагированным лучам пропорционально распределению мощности по соответствующим частотным компонентам сигнала.

При этом важно соотношение между пространственным периодом модуляции T звука и поперечным размером D светового пучка (рис. 2). Так, если период T больше фазовой задержки τ , то световое поле на выходе дефлектора состоит из про-

странственно пересекающихся лучей, если меньше, то из пространственно разделенных лучей.

2.2. Синтез акустического сигнала для многолучевой дифракции

Сигнал с угловой модуляцией, сформированный аналоговым методом, очень сложен в аппаратной реализации. Был разработан метод цифрового синтеза сигнала (подобного фазово-модулированному) из конечного набора монохроматических частотных компонент.

Из заданного набора частот можно создать различные по форме сигналы в зависимости от их фаз. Поэтому необходимо подобрать такие фазы составляющих, чтобы результирующий сигнал максимально приблизился к оптимальному фазово-модулированному виду. Методика синтеза таких узкополосных сигналов изложена в [21]. При этом фазы составляющих не являются жестко определенными, а подчиняются связям, число которых меньше числа частот. При расширении полосы частот необходима коррекция сигнала, что позволяет дополнительно увеличить полезную эффективность [22].

Если период сигнала в несколько раз меньше времени пересечения звуком световой апертуры, то угловое расстояние между соседними рабочими лучами в несколько раз больше ширины их углового спектра. Многолучевая картина является практически стационарной, испытывая небольшие периодические биения из-за частичного наложения рабочих лучей. Очевидно, что многолучевую картину заданного вида можно масштабировать в угловом пространстве.

Для этого нужно совместно менять угол расходимости падающего света и период акустического сигнала. Поэтому возможна реализация определенной многолучевой диаграммы направленности с различной шириной спектра акустического сигнала. При смене многолучевой картины возникают переходные искажения. Как показано в [23], искажения минимальны, если в момент изменения акустического сигнала его фаза не меняется.

Рис. 3 иллюстрирует деление на 7 равномошных лучей с суммарной полезной эффективностью 85%.

В табл. 1 представлены расчетные параметры, формирующие деление на $N = 8$ и 9 эквидистантных равномошных лучей (k – номера позиций, занимаемых лучами в эквидистантном угловом наборе, $k = 0$ – позиция в центре дифрагированной картины) по критерию максимальной суммарной эффективности. Здесь параметр $\alpha_k = v/\pi$ – доля индекса фазовой модуляции v (и управляющего напряжения) от величины, при которой достигается максимальная эффективность дифракции (близкая к 100%) в одночастотном режиме.

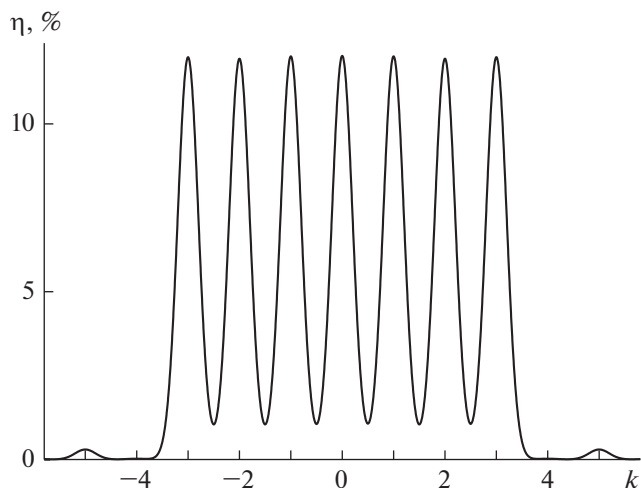


Рис. 3. Эквидистантная 7-лучевая диаграмма направленности.

Реализация наперед заданного набора дифракционных лучей осуществляется исключением из полного набора частот некоторых компонент. Например, исключение из 5-лучевой картины позиций $k = -1$ и 0 позволяет формировать 3-лучевую картину с однолучевой эффективностью 16% (см. результаты эксперимента ниже). Расчетные параметры для этого случая: $\alpha_{-2} = \alpha_1 = \alpha_2 = 0.31$, $\varphi_{-2} = -43^\circ$, $\varphi_1 = -1^\circ$, $\varphi_2 = -152^\circ$.

Важно, что методика позволяет формировать произвольное высокоэффективное многолучевое поле в пределах всего углового диапазона а.о.-устройства.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ ДИФРАКЦИИ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Таблица 1.

k	$\alpha_k, \varphi_k (N = 8)$ при $\eta_k = 11\%$ и $\Sigma\eta_k = 90\%$	$\alpha_k, \varphi_k (N = 9)$ при $\eta_k = 11\%$ и $\Sigma\eta_k = 97\%$
-4		0.34, -124°
-3	0.32, 53°	0.32, -70°
-2	0.36, 151°	0.32, 36°
-1	0.33, -45°	0.32, 79°
0	0.29, 0°	0.33, 0°
1	0.29, 0°	0.32, 0°
2	0.33, -45°	0.32, -121°
3	0.36, 151°	0.32, 54°
4	0.32, 53°	0.34, -79°

Примечание. η_k – эффективность дифракции в каждый отдельный луч; $\Sigma\eta_k$ – суммарная полезная эффективность.

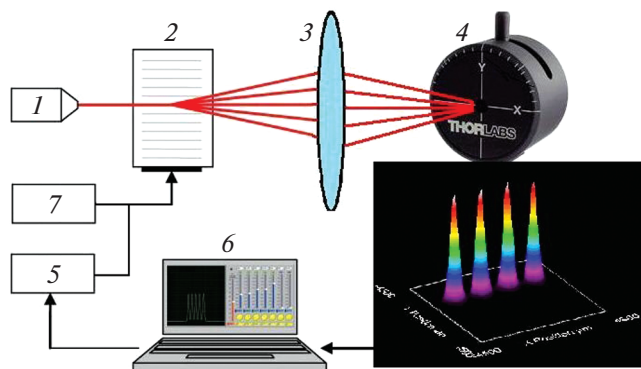


Рис. 4. Схема установки. 1 – одномодовый лазер с длиной волны 1.06 мкм и апертурой 0.6 мм; 2 – а.о.д.; 3 – формирующая оптическая система; 4 – измеритель профиля лазерного луча модели ВР104; 5 – усилитель мощности; 6 – компьютер; 7 – осциллограф.

Акустооптический дефлектор выполнен из кристалла TeO_2 , длина взаимодействия составляет 6 мм, акустическая и а.о.-полосы – от 20 до 45 МГц [24, 25]. Формировалось пять эквидистантных радиочастот – от 25 до 37 МГц с шагом 3 МГц. Для каждой частотной компоненты управляющего сигнала осуществлялась независимая установка амплитуды и фазы. Измеритель профиля отражал пространственное распределение дифрагированного поля. Сигнал на входе а.о.д. контролировался осциллографом. Рисунок 5 иллюстрирует относительную интенсивность дифракционных лучей (по оси абсцисс отложены абсолютные значения).

Видно, что подбор фаз обеспечивает заданное количество равноинтенсивных лучей при отсутствии “паразитных” и суммарной эффективности, близкой к 100%. Нарушение фазовых соотношений кардинальным образом меняет ситуацию: возника-

ют дополнительные интермодуляционные лучи, а интенсивности основных лучей становятся существенно неравными, и снижается суммарная эффективность. Это иллюстрирует основополагающий для многолучевой а.о.-дифракции факт – чувствительность взаимодействия к фазовым соотношениям внутри управляющего сигнала.

4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ

4.1. Система лазерного вывода изображения

Лазерные граверы предназначены для прямого изготовления печатных форм офсетной, высокой или глубокой печати, а также фотоформ гравированием посредством воздействия лазерного излучения большой мощности на фотоматериал. Как правило, используются лазеры с длиной волны 1.06 мкм, с помощью которых удаляется маска в местах формирования печатных элементов. Создание мощных лазеров и повышение чувствительности фотоматериалов обуславливают возможность повышения скорости записи. Многолучевой а.о.д. позволяет создать высокоскоростной лазерный гравер (рис. 6).

Вращение барабана обеспечивает развертку изображения по координате Y , а перемещение каретки с а.о.д. и коллиматором волоконного лазера – развертку по координате X . Высокая скорость записи обеспечивается одномоментным формированием линейки пикселей ΔX вдоль оси X .

Неполяризованное излучение мощного непрерывного волоконного лазера (мощность до 50 Вт, качество луча $M^2 < 1.05$) направляется на многолучевой а.о.д., состоящий из двух последовательно включенных а.о.д.: первый а.о.д. отклоняет одну поляризационную компоненту света, второй – ор-

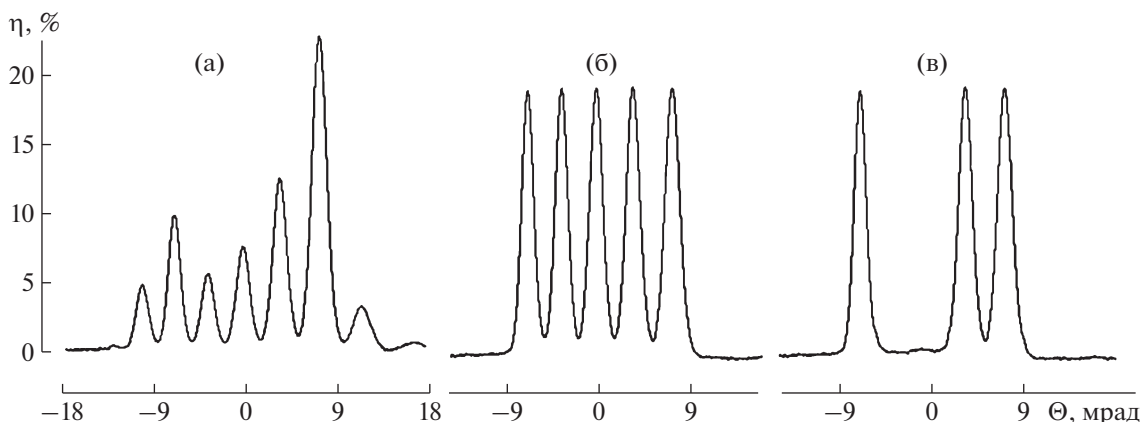


Рис. 5. Экспериментальные зависимости распределения дифракционного поля для случая: **а** – соотношение фаз между частотами случайное; **б** – соотношение фаз подобрано для максимальной эффективности пяти лучей; **в** – соотношение фаз для трех дифрагированных лучей.

тогональную [26–28]. Чередование ортогонально поляризованных лучей от каждого а.о.д. обеспечивает:

– отсутствие интерференционных эффектов вблизи соседних пикселей на обрабатываемом материале;

– снижение ограничений, связанных с разрешающей способностью а.о.д., – угловое расстояние между лучами для каждого дефлектора равно трем расходимостям входного света.

Параллельная многоканальная запись изображения существенно повышает производительность гравера.

4.2. Коммутатор-мультиплексор волоконно-оптических каналов

Многочувствительный а.о.д. является основой системы коммутатор-мультиплексор волоконно-оптических каналов с алгоритмом переключения каналов $1 \times N$ [29–33].

По сравнению с однокоординатной схемой число выходных каналов возрастает в квадрате при использовании двухкоординатного а.о.д. (рис. 7).

Свет выходного световода коллимируется оптикой L_1 и поступает на двухкоординатную систему дефлекторов а.о.д.1 и а.о.д.2, после чего оптикой L_2 фокусируется на выходную матрицу световодов.

Примеры возможных двумерных распределений интенсивности света в плоскости матрицы выходных световодов представлены на рис. 8.

Варианты мультиплицирования:

- во все входные каналы матрицы одновременно;
- в произвольную прямоугольную область матрицы;
- в любой набор одной строки или одного столбца матрицы;
- в пересечение набора строк с набором столбцов матрицы.

4.3. Управление энергетическим профилем лазерного излучения

В системах лазерной обработки материалов нормальное (гауссово) угловое распределение интенсивности лазерного излучения не является оптимальным. На рис. 9 представлено нормированное гауссово угловое распределение.

Примем, что энергетический порог воздействия на обрабатываемый материал равен уровню $I_0 = 0.9$, тогда отношение полезно используемой мощности к полной мощности для гауссова луча составляет $\approx 35\%$. Для эффективного использования мощности лазера целесообразен свет с профилем,

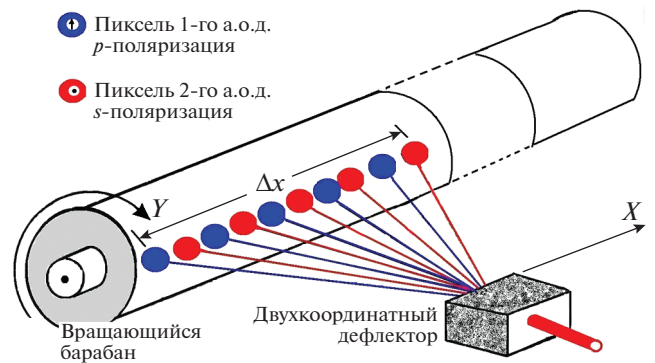


Рис. 6. Схема гравера.

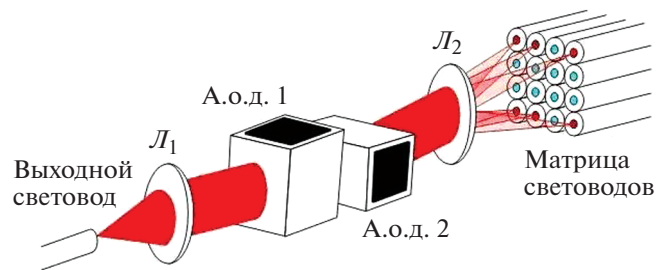


Рис. 7. Схема двухкоординатного переключателя каналов. L_1, L_2 – линзы.

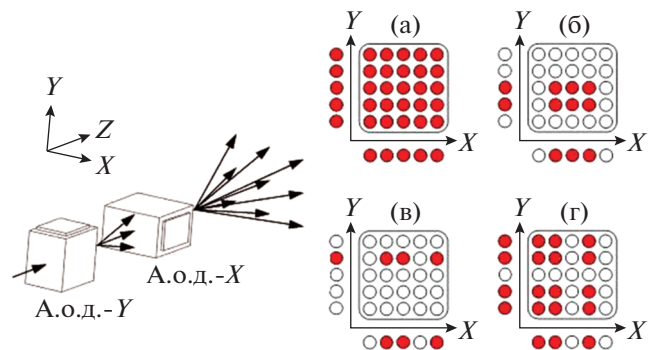


Рис. 8. Примеры некоторых комбинаций работы переключателя: а – все элементы матрицы “освещены” лазерным излучением равномерно; б–г – лазерный свет в равных энергетических пропорциях подается на определенные элементы матрицы. А.о.д.-Y, а.о.д.-X – дефлекторы с отклонением по Y- и X-координатам соответственно. Направляемые на матрицу лучи закрашены.

близким к П-образному, а в ряде случаев – и к более сложному.

Промышленность выпускает оптические линзовые системы, трансформирующие исходно гауссов лазерный луч в излучение с неизменяемым профилем, близким к прямоугольному, – шейпер (shaper). Акустооптические методы позволяют быстропере-

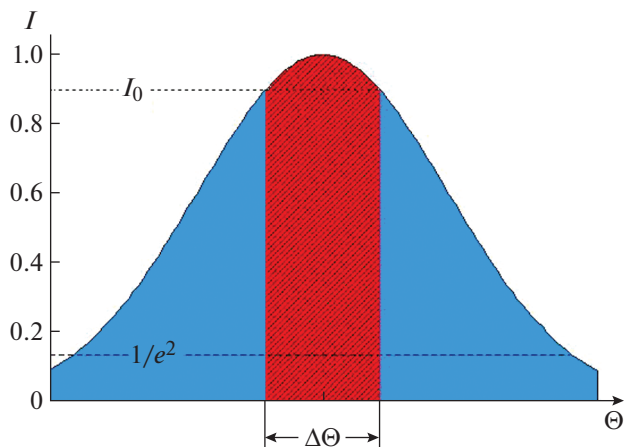


Рис. 9. Гауссово угловое распределение лазерного света: Θ – нормированные углы, I – относительная интенсивность. Используемая энергетическая угловая часть $\Delta\Theta$ по уровню $I_0 = 0.9$.

менно модифицировать профиль лазерного луча [34, 35], в том числе и многолучевым методом [36].

Как было указано в разд. 2, отношение периода модуляции T к времени пересечения звуком апертуры света τ определяет степень перекрытия лучей. В данном случае используется режим, когда $T > \tau$, и соседние лучи перекрываются с образованием единого луча (см. рис. 3 и 2б). Число, соотношения амплитуд и фаз управляющих сигналов определяют форму итогового профиля луча, в частности прямоугольность. Отметим, что термин “единый луч” корректен, если не учитывать интерференцию (биения), возникающую в областях перекрытия лучей; частота биений равна разности частот ближайших электрических сигналов (0.3 МГц в условиях эксперимента). В большинстве практических случаев, связанных с лазерной обработкой материалов, смещение луча “от точки к точке” не превышает десятков миллисекунд. При таком усреднении термин “единый луч” вполне правомерен.

На рис. 10 представлены зависимости относительной интенсивности η лазерного излучения от угловых характеристик света на выходе а.о.д., полученные при измерениях на экспериментальной установке, описанной в разд. 3. Профиль на рис. 10б прямоугольный, а профиль на рис. 10в предпочтителен в системах, когда лазерный нагрев в центре луча чрезмерен, а по периметру недостаточен, например при наплавке металлов в 3D-принтерах.

По результатам можно резюмировать, что эффект многолучевой а.о.-дифракции позволяет формировать распределения лазерного излучения как П-образной, так и другой формы при суммарной эффективности $\geq 85-90\%$. Принципиальное достоинство метода – возможность

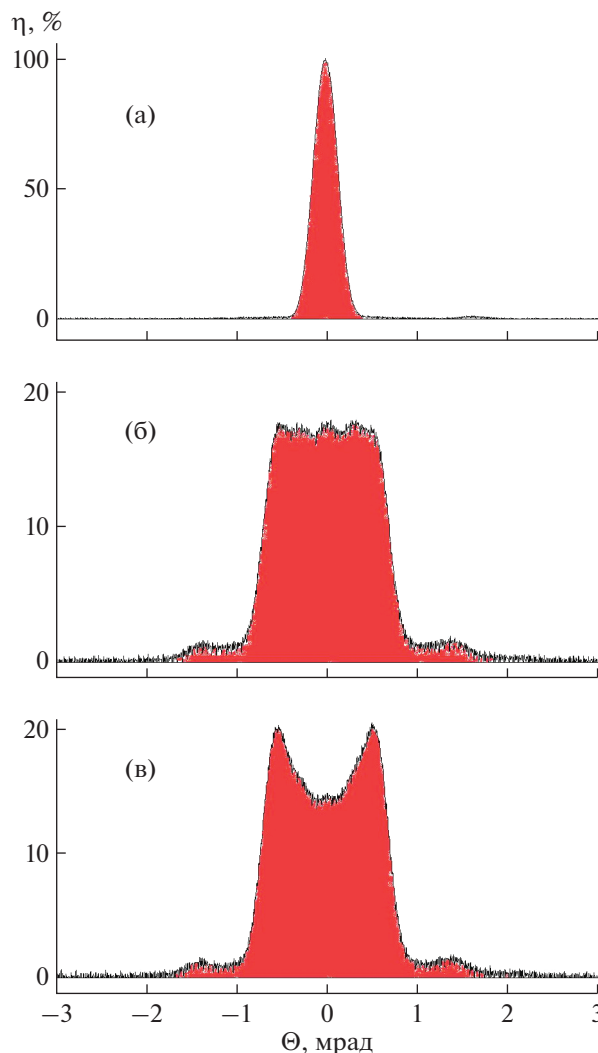


Рис. 10. Профиль дифрагированного поля: **а** – при одной управляющей частоте 41 МГц; **б** – П-образный профиль при пяти управляющих частотах – центральной 41 МГц и четырех симметрично расположенных боковых ± 0.3 и ± 0.6 МГц; **в** – с провалом в центре, полученным изменением соотношения амплитуд сигнала для П-образного профиля.

быстрого изменения энергетической формы выходного луча. Быстродействие определяется скоростью звука в а.о.-кристалле и апертурой света и достигает в эксперименте около 10 мкс.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически и экспериментально изучен эффект многолучевой акустооптической дифракции – деление лазерного излучения на несколько независимых управляемых лучей (каналов) без принципиальных потерь световой мощности. Показано, что для ее реализации необходимо, чтобы акустический сигнал имел угловую (частотную, фазовую) модуляцию. Разработан алго-

ритм цифрового синтеза управляющего сигнала, обеспечивающего максимальную суммарную эффективность дифракции. Выполнен расчет необходимых параметров акустического сигнала. Экспериментально изучен данный тип дифракции, подтверждены теоретические положения. Приведены примеры использования а.о.-устройств, реализующих режим многолучевой акустооптической дифракции в системах: лазерный гравер, лазерный маркер, коммутатор-мультиплексор волоконно-оптических каналов, а.о.-формирователь энергетического профиля лазерного излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Warner A.W., White D.L., Bonner W.A. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 4489.
<https://doi.org/10.1063/1.1660950>
2. Yano T., Kawabuichi M., Fukumoto A., Watanabe A. // Appl. Phys. Lett. 1975. V. 26. P. 689.
<https://doi.org/10.1063/1.88037>
3. Dixon R.W. // IEEE J. Quant. Electron. 1067. V. 3. P. 85.
<https://doi.org/10.1109/JQE.1967.1074447>
4. Lean E.G.H., Quate C.F., Shaw H.J. // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 10. P. 48.
<https://doi.org/10.1063/1.1754841>
5. Korpel A. Acousto-optics. N.Y.: Marcel Dekker, 1988.
6. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978.
7. Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
8. Turunen J., Tervonen E., Friberg A.T. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. P. 49.
<https://doi.org/10.1063/1.345232>
9. Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1982.
10. Voloshinov V.B. // Ultrasonics. 1993. V. 31. P. 333.
[https://doi.org/10.1016/0041-624X\(93\)90066-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(93)90066-9)
11. Kastelik J.C., Pommeray M., Kab A., Gazalet M.G. // Pure Appl. Opt. 1998. V. 7. P. 467.
<https://doi.org/10.1088/0963-9659/7/3/008>
12. Гуляев Ю.В., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Шакин О.В. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 4. С. 283.
13. Kastelik J.-C., Dupont S., Yushkov K.B., Gazalet J. // Ultrasonics. 2013. V. 53. P. 219.
<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.06.003>
14. Hecht D. // IEEE Trans. Sonics Ultrason. 1977. V. 24. P. 7.
<https://doi.org/10.1109/T-SU.1977.30905>
15. Gazalet M.G., Carlier S., Picault J.P., Waxin G., Bruneel C. // Appl. Opt. 1985. V. 24. P. 4435.
<https://doi.org/10.1364/AO.24.004435>
16. Tao Yongchuan, Xu Jieping // J. Opt. Soc. Am. A. 1992. V. 9. P. 2223.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.9.002223>
17. Gazalet M.G., Kastelik J.C., Bruneel C., Bazzi O., Bridoux E. // Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 2455.
<https://doi.org/10.1364/AO.32.002455>
18. Балакиев В.И., Сливинский А., Толпин К.А. // Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 87. Вып. 6. С. 1010.
19. Антонов С.Н. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 122.
20. Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 4. С. 472.
21. Антонов С.Н., Резвов Ю.Г. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 93.
22. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 79.
23. Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г. // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 4. С. 478.
24. Антонов С.Н. // Акустический журнал. 2017. Т. 63. Вып. 4. С. 364.
<https://doi.org/10.7868/S0320791917030017>
25. Антонов С.Н. // Акустический журнал. 2018. Т. 64. Вып. 4. С. 432.
26. Антонов С.Н. // ПТЭ. 2019. № 3. С. 89.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219020174>
27. Антонов С.Н. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 1. С. 132.
28. Антонов С.Н. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 1. С. 136.
29. Aubin G., Sapriel J., Molchanov V., Gabet R., Grosso P., Gosselin S., Jaouen Y. // Electronics Letters. 2004. V. 40. P. 448.
<https://doi.org/10.1049/el:20040280>
30. Зайченко К.В., Гуревич Б.С. // Оптический журнал. 2017. Т. 84. Вып. 2. С. 95.
31. Proklov V.V., Antonov S.N., Vainer A.V., Rezvov Yu.G. // IEEE Ultrasonics Symposium Proc. 2007. P. 825.
<https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2007.211>
32. Antonov S.N., Vainer A.V., Proklov V.V., Rezvov Yu.G. // Applied Optics. 2009. V. 48. C171.
<https://doi.org/10.1364/AO.48.00C171>
33. Антонов С.Н. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. Вып. 3. С. 383.
<https://doi.org/10.21883/OS.2018.09.46555.3-18>
34. Akemann W., Leger J.-F., Ventalon C., Mathieu B., Dieudonne S., Bourdieu S. // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 28191.
<https://doi.org/10.1364/OE.23.028191>
35. Grinenko A., MacDonald M.P., Courtney C.R.P., Wilcox P.D., Demore C.E.M., Cochran S., Drinkwater B.W. // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 26.
<https://doi.org/10.1364/OE.23.000026>
36. Антонов С.Н., Филатов А.Л. // ЖТФ. 2018. Т. 87. Вып. 1. С. 93.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2018.01.45489.2266>