

Акустооптическое управление энергетическим профилем лазерного излучения

© С.Н. Антонов, А.Л. Филатов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино, Московская обл., Россия
e-mail: olga-ant@ya.ru

(Поступило в Редакцию 25 марта 2017 г. В окончательной редакции 17 мая 2017 г.)

Разработан акустооптический шепер (shaper) — прибор, предназначенный для преобразования гауссова лазерного излучения в вид, близкий к прямоугольному. В отличие от линзовых приборов акустооптический позволяет модифицировать форму выходного луча при фиксированной оптической конфигурации путем изменения радиуправления с высоким быстродействием (около $10 \mu\text{s}$). Основой метода является многолучевая высокоэффективная брэгговская дифракция, при которой реализуется угловое перекрытие дифракционных порядков. Показано, что с эффективностью не менее 80% можно производить преобразование формы лазерного луча не только в прямоугольный вид, но и в более сложный. Эксперименты произведены на базе кристалла TeO_2 .

DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45489.2266

Введение

Акустооптика (АО) — воздействие акустически сформированных дифракционных решеток на проходящий свет. Изучались разнообразные возможности АО: анализаторы радиосигналов, приборы спектральной обработки изображений, оптические процессоры и др. [1]. Однако многосторонняя технологическая революция оставила только направления, связанные с управлением параметрами лазерного излучения (ЛИ): дефлекторы (сканеры) и модуляторы (сдвигатели частоты) света.

Ренессанс АО связан с революцией в лазерной технике — созданием мощных (более десятков kW), компактных, с выдающимся КПД (вплоть до 50%) волоконных лазеров. Тут и проявились особенности АО — управление очень интенсивным лазерным излучением (более 1 kW/cm^2), достаточно высокое быстродействие (вплоть до десятков ns), отсутствие механически перемещаемых элементов, малые вносимые световые потери (до единиц процентов), практически неограниченный ресурс работы [2].

Акустооптические модуляторы формируют „гигантский“ импульс в импульсных лазерах [3]. Дефлекторы (сканеры) применяются в системах обработки материалов, устройствах лазерного вывода изображений, переключателях оптических каналов при оптической передаче данных, устройствах навигации и позиционирования элементов конструкций.

В настоящей работе сообщаем о новом применении АО — управление энергооптического профиля (ЭП) лазерного излучения.

Энергетический профиль лазерного излучения

Решаемая проблема связана с тем, что в системах лазерной обработки материалов: резка, маркировка, сварка

и т.д. нормальное (гауссово) угловое распределение интенсивности ЛИ не является оптимальным. На рис. 1 показано нормированное гауссово угловое распределение — непрерывная кривая 1 и порог — линия 2, ниже требуемого воздействия (испарение, горение) на материал не происходит.

В качестве примера энергетический порог воздействия равен уровню $I_0 = 0.9$. Тогда отношение площади заштрихованной части (полезно используемой мощности) ко всей площади под кривой (полной мощности) составляет $\approx 35\%$, и более 60% потока энергии не используется. Для эффективного использования мощности ЛИ целесообразен свет с ЭП, близким к П-образному, а в ряде случаев и более сложному. Так, например, в системах спекание металлического порошка в 3-D принтерах более выгоден не плоский, а неровный „верх“ распределения ЛИ. На рис. 2 показан один из промышленных приборов такого типа — оптический шейпер (shaper) модели $\pi\text{Shaper 12-12-355}$. Прибор со-

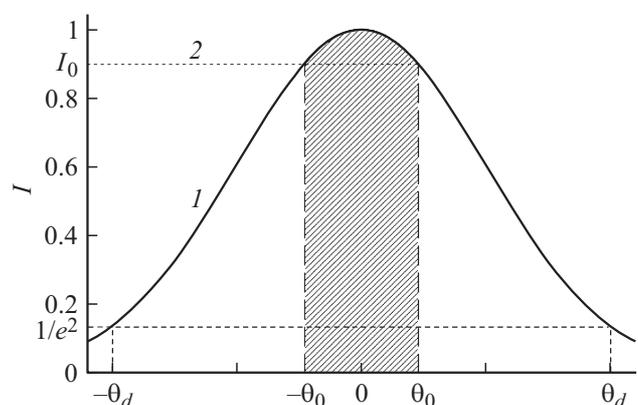


Рис. 1. Классическая форма гауссового распределения. Энергетическая часть заштрихована. Θ — нормированные углы, I — относительная интенсивность света.

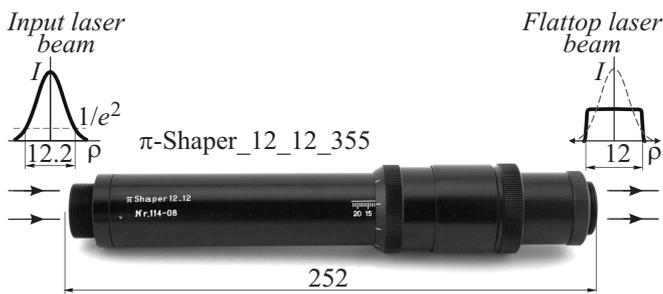


Рис. 2. Внешний вид линзового шейпера.

стоит из несколько специально изготовленных линз. Исходно гауссовый лазерный луч трансформируется в излучение с неизменяемым (для контртенной модели прибора) ЭП, близким к прямоугольному.

Настоящая работа посвящена АО-шейперу, позволяющему быстропеременно изменять параметры ЭП выходного луча при фиксированной оптической конфигурации — положению АО прибора и параметрах входного луча.

Акустооптическая высокоэффективная многолучевая дифракция

Формирование ЭП базируется на недавно обнаруженном АО-эффекте [4–7] — многолучевой брэгговской АО-дифракции, который обеспечивает высокоэффективное (до 100%) расщепление одного входного лазерного луча на несколько лучей с одинаковой интенсивностью. До работы [4] полагалось, что такое расщепление возможно только при малой суммарной эффективности в отклоненных лучах, что поясняется рис. 3.

Входной лазерный луч k_0 „разбивается“ на дифракционные порядки при подаче на пьезопреобразователь нескольких независимых частот. Если суммарная мощность сигнала соответствует индексу АО фазовой модуляции, близкой к π , то в общем случае

— возникнут дифракционные порядки (рабочие) k_1 , связанные с наличием вводимых акустических волн,

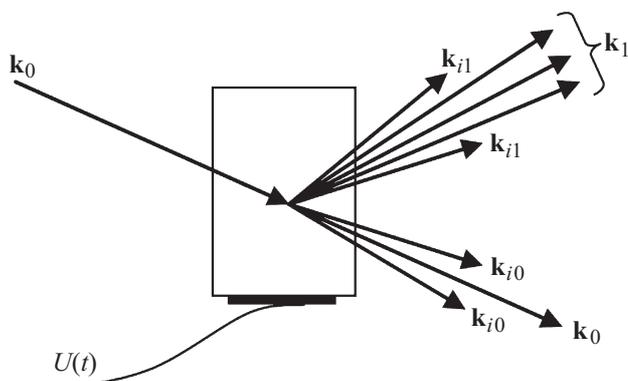


Рис. 3. Диаграмма образования основных и паразитных дифракционных лучей при многочастотной АО-дифракции.

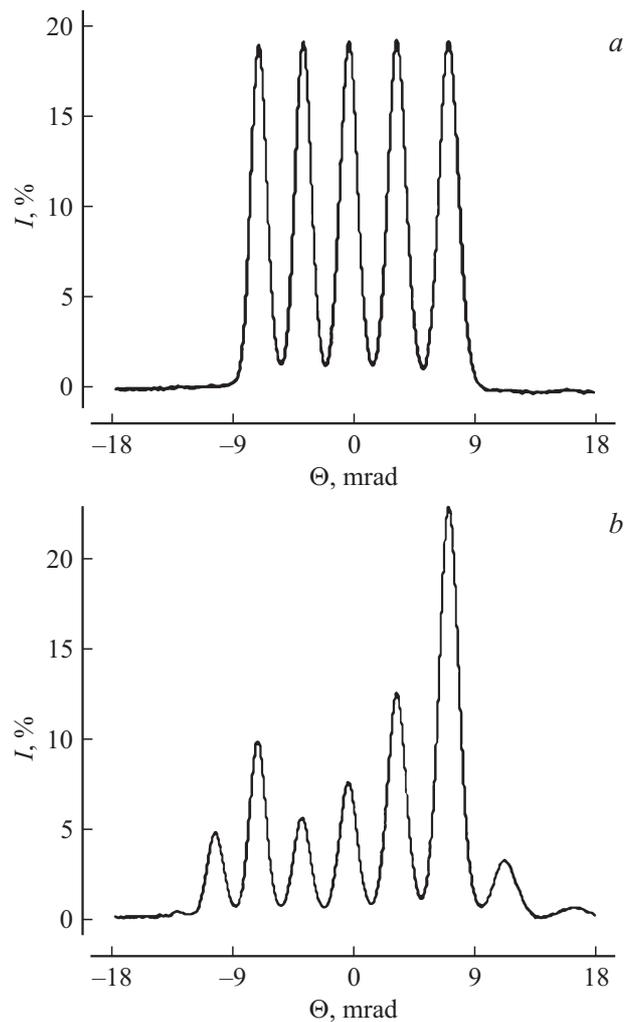


Рис. 4. Экспериментальные угловые распределения световой мощности: *a* — с оптимальными фазовыми соотношениями радиосигнала, *b* — со случайными фазами сигналов.

— помимо этого, в силу интермодуляционных эффектов в дифрагированном поле и вблизи нулевого порядка возникнут дополнительные порядки k_{i1} и k_{i0} соответственно,

— интенсивность каждого из основных лучей будет нелинейным (сложным) образом зависеть от количества и мощностей вводимых электрических сигналов.

Новая особенность АО проявляется, когда акустический сигнал подобен частотно-модулированному, т.е. представляет собой сумму синусоидальных сигналов, эквидистантных по частоте и связанных по фазе и амплитуде такими соотношениями, которые минимизируют амплитудную модуляцию сигнала [5]:

$$U(t) = a(t) \exp(i\omega t), \quad a(t) = \sum_n (A_n \exp(in\Omega t + i\varphi_n)),$$

$$|a(t)| \approx \text{const.} \quad (1)$$

Здесь $U(t)$ — электрический сигнал, подаваемый на пьезопреобразователь АО-модулятора, ω — его центральная частота, i — мнимая единица, $a(t)$ — комплексная

огibaющая сигнала, A_n — действительные амплитуды отдельных частотных компонент (их число — n), φ_n — начальные фазы частотных компонент, Ω — шаг частот спектра сигнала. Важно, чтобы период модуляции был меньше времени прохода звука через апертуру света. Кроме того, интенсивность каждого из основных лучей будет сложным, нелинейным образом зависеть от количества и мощностей всех частотных компонент сигнала, и при равных мощностях компонент интенсивности лучей будут неодинаковы. Найденная новая особенность АО-взаимодействия проявляется тогда, когда акустический сигнал подобен частотно-модулированному, т.е. представляет собой сумму синусоидальных сигналов, эквидистантных по частоте и связанных по фазе и амплитуде такими соотношениями, которые минимизируют амплитудную модуляцию суммарного сигнала.

Выполнение условия (1) обеспечивает практически полное исчезновение интермодуляционных „паразитных“ дифракционных порядков и отклонение всей световой мощности в основной дифракционный порядок k_1 . При этом каждая угловая компонента порядка связана только с соответствующим электрическим сигналом. При величине Ω , превышающей некоторое значение, дифракционное поле состоит из отдельных неперекрывающихся световых лучей.

Рис. 4 проиллюстрирует эффект многолучевой дифракции. На осциллограммах показан угловой спектр света на выходе АО-модулятора при подаче на него суммы пяти синусоидальных электрических сигналов. Здесь ось X — угловая координата, ось Y — интенсивность световых лучей. Рис. 4, *a* — фазовые и амплитудные соотношения между сигналами подобраны так, чтобы суммарный акустический отклик был подобен частотно-модулированному. В результате дифрагированное поле состоит из пяти лучей равной интенсивности при суммарной эффективности дифракции, близкой к 100%. Рис. 4, *b* соответствует случайному фазовому соотношению между сигналами, но с теми же амплитудами.

П-образный энергетический профиль, практические результаты

Многолучевая АО-дифракция явилась базой для создания АО-шейпера. Решение заключается в следующем. Из (1) следует, что уменьшение Ω будет приводить к перекрытию соседних лучей и образованию единого луча. Степень перекрытия определяется величиной Ω . Таким образом, количество лучей и степень перекрытия определяют угловую ширину итогового луча, а угол наклона „краев“ луча связан с параметрами исходного гауссова пучка. Величины амплитуд A_n и значения фаз φ_n определяют форму итогового луча. Заметим, что П-образность — это частный случай, что будет показано ниже.

Отметим существенный факт. Термин „единый луч“ корректен лишь в том случае, если не учитывать интерференцию (биения), возникающую в областях перекрытия соседних лучей. Частота биений равна разности

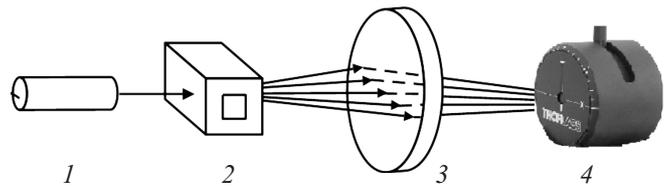


Рис. 5. Оптическая схема измерительной установки.

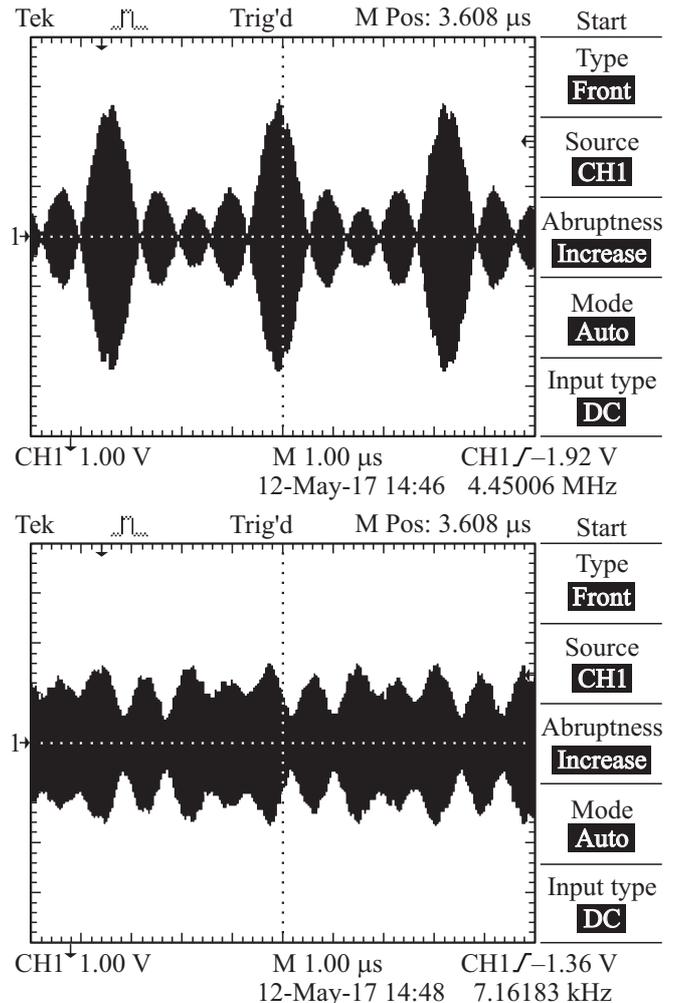


Рис. 6. Электронная фотография сигналов на входе АО-дефлектора: *a* — произвольное фазовое соотношение между частотными компонентами, *b* — подобранные фазовые соотношения.

частот ближайших электрических сигналов (в условиях эксперимента это 0.3 MHz). В большинстве практических случаев, связанных с лазерной обработкой материалов, смещение луча или материала „от точки к точке“ не превышает десятка миллисекунд. При таком усреднении термин единый луч вполне правомерен.

Принципиальная оптическая схема установки приведена на рис. 5. Базовый инструмент — измеритель профиля оптического излучения модели THORLABS

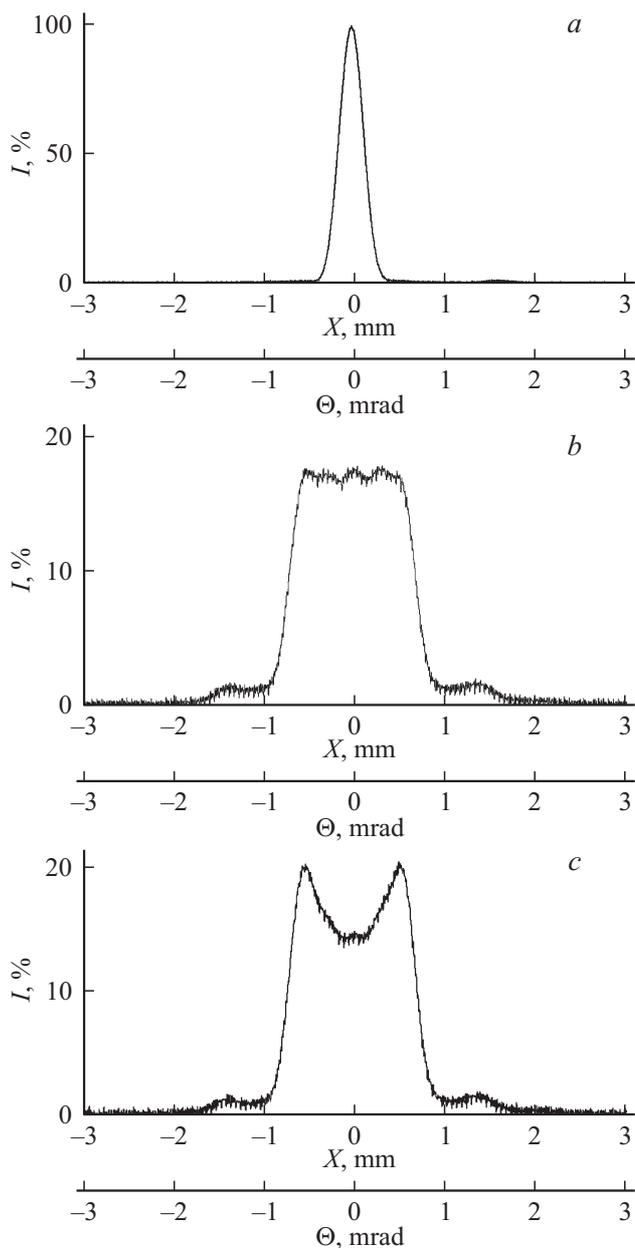


Рис. 7. Экспериментально измеренные профили лазерного луча: *a* — исходный лазерный луч, *b* — П-образный профиль, *c* — профиль с провалом в центре.

ВР104 с основными параметрами: скорость вращения щели — 10 Hz, диаметр входного окна — 10 mm, размер щели $10 \mu\text{m}$. При расчете и создании оптической схемы выполнялось условие, чтобы 1 mm координатного смещения на измерителе профиля соответствовал 1 mrad отклонения луча на выходе АО-модулятора. Оценочная относительная точность измерения положения луча составила 2–3%.

На рис. 5: 1 — одномодовый лазер с длиной волны $0.63 \mu\text{m}$ и апертурой 3 mm, 2 — АО-дефлектор, 3 — линза с фокусом 1 m, 4 — измеритель профиля лазерного луча.

АО-дефлектор изготовлен из парателлуриата (TeO_2), в котором возбуждалась медленная сдвиговая волна в направлении, составляющем 6° с кристаллографической осью [110]. Исходный световой луч с длиной волны $1.06 \mu\text{m}$ распространялся в кристалле под углом $\sim 3^\circ$ к оптической оси и имел поляризацию необыкновенной моды (так называемая геометрия взаимодействия широкополосного анизотропного дефлектора) [8].

Пьезопреобразователь выполнен из пластины ниобата лития (LiNbO_3) толщиной $60 \mu\text{m}$, генерирующий чисто сдвиговую акустическую моду. Преобразователь обеспечивал эффективное преобразование ультразвука в полосу от 20 до 50 MHz, что было достигнуто использованием технологии акустического согласования импедансов [9].

Эксперименты проводились в ситуации, качественно аналогичной рис. 4, *a*, когда на АО-модулятор подавались пять радиочастот. В нашем случае разность частот была меньше для обеспечения перекрытия ближайших лучей: центральная частота — 41 MHz и четыре симметрично расположенных боковых $\pm 0.3 \text{ MHz}$, $\pm 0.6 \text{ MHz}$. Итерационно подбирались амплитуды и фазы каждой частотной компоненты (A_n и φ_n) по критерию результата — достижения П-образной формы луча при максимальной интенсивности. Как указывалось в (1), эта ситуация соответствует минимальной общей амплитудной модуляции управляющего электрического сигнала. Для иллюстрации последнего на рис. 6 показаны осциллограммы сигналов, подаваемых на АО-дефлектор.

Рис. 6, *a* — временная зависимость амплитуды сигнала при произвольно установленных фазовых соотношениях между частотными компонентами. Рис. 6, *b* — то же, но фазовые соотношения подобраны по указанному критерию. Видно, что при неоптимальных фазах сигнал имеет значительную амплитудную модуляцию, а при подобранных соотношениях амплитудная модуляция существенно снижается (1).

На рис. 7 представлена серия экспериментально измеренных зависимостей относительной интенсивности ЛИ от сигналов управления. На графиках: I — относительная интенсивность, X — размер луча на измерителе профиля, Θ — пересчитанная угловая зависимость на выходе АО-дефлектора.

Результаты эксперимента

1. Многолучевая АО-дифракция позволяет реализовать вид лазерного излучения, близкий к П-образному, при суммарной эффективности не менее чем 80–85%.

2. Можно обеспечить и другие практически важные формы, например, реализовать ЭП с провалом в центре, что целесообразно при обработке металлов, когда нагрев в центре луча чрезмерен из-за отвода тепла.

Принципиальное достоинство метода — возможность быстропеременного изменения энергетической формы выходного луча. Быстродействие определяется скоростью звука в АО-ячейке и апертурой света и составило в эксперименте около $10 \mu\text{s}$.

Выводы

На базе многолучевой брегговской АО-дифракции предложено создание АО-шейпера. Детально рассмотрены условия, необходимые для реализации режима АО-шейпера. В отличие от линзовых приборов такого типа акустооптические позволяют быстропеременно управлять формой оптического луча, меняя характер электрического управления. Быстрая перестройка формы луча может использоваться в технологических процессах лазерной обработки материалов для выбора оптимального технологического режима.

Проведены эксперименты на серийном АО-дефлекторе, подтвердившие расчетные результаты. Реализованы как П-образная энергетическая форма, так и форма с провалом в центре. Суммарные потери не превысили 80%, быстродействие $10 \mu\text{s}$.

Выражаем благодарность А.В. Вайнеру за внимание к работе.

Список литературы

- [1] *Магдич Л.Н., Молчанов В.Я.* Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978. 111 с.
- [2] Электронный ресурс. Проспект фирмы Gooch & Housego. Режим доступа: <http://www.goochandhousego.com>
- [3] *Донин В.И., Яковин Д.В., Грибанов А.В.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 101. Вып. 12. С. 881.
- [4] *Антонов С.Н.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 122.
- [5] *Антонов С.Н., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 93.
- [6] *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 79.
- [7] *Антонов С.Н., Вайнер А.В., Проклов В.В., Резвов Ю.Г.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 11. С. 65.
- [8] *Семенов В.П.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 29.
- [9] *Антонов С.Н.* // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 3. С. 1.