

ДИФРАКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

А.Соколов, д.ф.-м.н., В.Мурашкин, ОАО «НПК СПП», alsokolov@bk.ru

В работе рассматриваются дифракционные поляризационно-оптические элементы с радиальной симметрией на примере уголковых отражателей. Исследуются дифракционные картины в дальней зоне излучения, отраженного от уголковых отражателей с различным покрытием граней. Показано, что оптимальным выбором покрытия можно существенно изменять вид дифракционной картины и тем самым оптимизировать ее для различных навигационных задач.

Основным устройством дифракционной (компьютерной) оптики является *дифракционный оптический элемент* (ДОЭ) [1]. При использовании в ДОЭ анизотропных материалов или оптических элементов, свойства которых зависят от состояния поляризации падающего света, дифракционные картины ортогональных эллиптически поляризованных компонент электромагнитного поля в общем случае оказываются различными. Такие устройства можно назвать *дифракционными поляризационно-оптическими элементами* (ДПОЭ).

При радиальной симметрии дифракционных поляризационно-оптических элементов амплитудно-фазовые функции следует задавать в полярной системе координат. В частности, эти функции могут зависеть только от радиуса или различаться для секторов, т. е. быть постоянными в определенном диапазоне азимутальных углов для каждой компоненты вектора E . В последнем случае секторы имеют разные поляризационные свойства. Соответственно, не одинаковы их матрицы Джонса и собственные состояния поляризации. Так, уголковый отражатель (УО) [2–6], очевидно, служит примером радиального ДПОЭ, каждый из шести секторов которого описывается развернутой линейной фазовой пластинкой и вращателем. Данная статья посвящена поля-

ризационным характеристикам уголковых отражателей.

Уголковый отражатель (УО) является уникальным оптическим устройством, которое при определенных условиях изменяет направление падающего луча на противоположное, независимо от угла падения. На рис.1 показан ход луча в УО. Свойство УО оборачивать луч находит множество применений. Например, в катафотах – оптических устройствах, которые располагаются на задних фонарях велосипедов.

В чем же состоят основные требования к изготовлению и использованию УО. Во-первых, необходимо, чтобы углы между гранями были равны 90 градусам с погрешностью не более одной угловой секунды. В противном случае отраженный луч уже не параллелен падающему лучу.

Другим условием является неподвижность УО. Если объект, на

котором находится УО, движется, то возникает так называемое явление *скоростной аберрации*, вследствие которого луч отклоняется на угол $2u/c$, где u – тангенциальная составляющая скорости движения объекта, а c – скорость света.

Заметим, что если падающий луч поляризован, то его состояние поляризации после отражения в общем случае изменится.

Ретрорефлекторные системы на базе уголковых отражателей устанавливаются на геодезических и навигационных спутниках для отражения луча лазерного дальномера. Измерение времени пути лазерного импульса позволяет с высокой точностью определить параметры орбиты спутника и координаты наземного пункта [2]. На рис.2 показаны уголковые отражатели, закрепленные в металлическом стекле, которые изготавливаются в ОАО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», а также панель УО.

На рис.3 показан высокоорбитальный лазерный спутник «Эталон-2», предназначенный для решения прикладных задач навигации. Высота орбиты спутника 19 100 км, количество уголковых отражателей 2142 шт., диаметр 1294 мм, масса 1300 кг.

Специфика применения УО в системах спутниковой дальнометрии определяется явлением *скоростной аберрации* (рис.4). Отклонение лазерного луча зависит от высоты орбиты спутника и

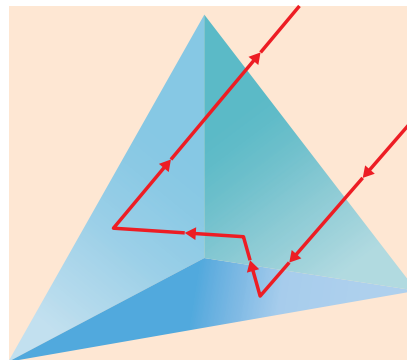


Рис.1. Ход луча в уголковом отражателе



Рис.2. Угловые отражатели: а – устройство УО в сборке; б – панель УО

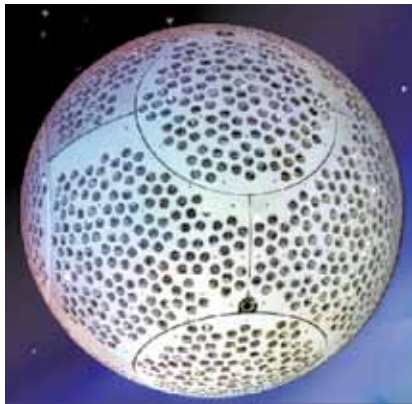


Рис.3. Высокоорбитальный лазерный спутник «Эталон-2»

может достигать при небольших высотах 10 угловых секунд, что означает смещение центра светового пятна на поверхности Земли на десятки-сотни метров от передатчика. Следовательно, для работы дальномерной системы необходимо, чтобы энергия отраженного лазерного пучка была сосредоточена на определенном расстоянии от оптической оси.

Если на УО падет плоская волна, то в дальней зоне образуется дифракционная картина, вид которой зависит от многих факторов, например, от вида покрытия отражающих граней. В частном случае, это дифракционная картина Эйри с угловой шириной центрального максимума между первыми нулями $2\gamma \approx 2,44 \lambda/D$, где D – диаметр апертуры УО.

ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЕННОГО ОТ УО

Расчет дифракционной картины излучения, отраженного от УО, представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку в результате отражения образуется шесть когерентных пучков и приходится учитывать различ-

ное состояние поляризации пучков, их расширение по мере распространения в пространстве и интерференцию [3–6].

Возникновение шести пучков определяется тем, что луч может пройти путь внутри УО шестью разными способами, в зависимости от попадания на один из шести секторов входной грани (рис.5). Например, луч входит в сектор 1, последовательно отражается от грани А, В и С УО и выходит из сектора 4.

Каждое из трех отражений характеризуется сдвигом фазы между E_p и E_s – ортогональными компонентами вектора E (линейной фазовой анизотропией): $\delta = \delta_p - \delta_s$; при этом плоскости падения луча на грани не совпадают. Угол падения на каждую грань УО равен $\arctg \sqrt{2} \approx 54,7^\circ$, а угол между плоскостями падения на грани равен $\alpha = \pm 60^\circ$. Для описания поляризационных свойств УО необходимо рассматривать шесть результирующих матриц Джонса для различных комбинаций хода луча с учетом поворотов системы координат и сдвига фазы δ на отражающих гранях. Каждый сектор УО характеризуется определенными амплитудно-фазовыми коэффициентами пропускания для ортогональных компонент вектора E .

Расчет характеристик УО в дальней зоне может проводиться с помощью метода, который состоит в представлении отраженного излучения совокупностью когерентных мод Эрмита-Гаусса с различной амплитудой, фазой и состоянием поляризации [7].

Одним из эффективных способов изменения и оптимизации диаграммы направленности отраженного излучения является управление сдвигом фаз компонент вектора E при преломлении

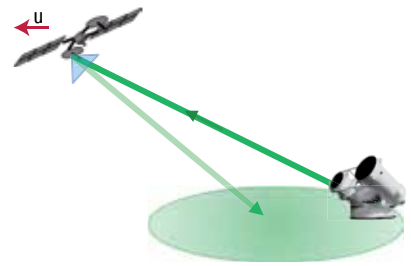


Рис.4. Применение УО в системах спутниковой дальнометрии

и отражении света на гранях УО, что в первую очередь определяется видом покрытия граней или его отсутствием.

Рассмотрим случай линейной поляризации излучения, падающего на УО, на отражающих гранях которого отсутствует какое-либо покрытие (в этом случае происходит полное внутреннее отражение и сдвиг фазы $\delta \approx -42^\circ$ при $n = 1,457$). В дальней зоне (например, в фокальной плоскости коллиматора) наблюдаются картины распределения интенсивности в виде семи пятен. Шесть пятен расположены вокруг центрального пятна на угловом расстоянии от центра, которое, как показывают расчеты и эксперименты, примерно равно $1,4\gamma_m$, где $\gamma_m = \lambda/D$.

Состояние поляризации в каждом из семи пятен непрерывно изменяется. Преимущественная ориентация вектора E показана на рис.6.

Центральное пятно всегда имеет состояние поляризации, совпадающее с исходным состоянием поляризации падающего пучка. Состояние поляризации света в пределах периферийных пятен является эллиптическим.

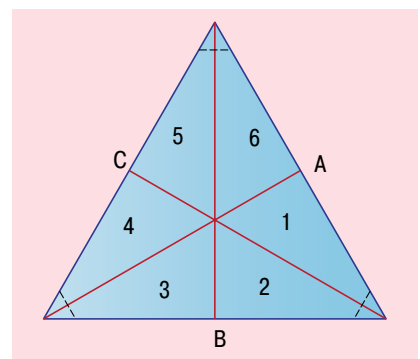


Рис.5. Сектора входной грани УО

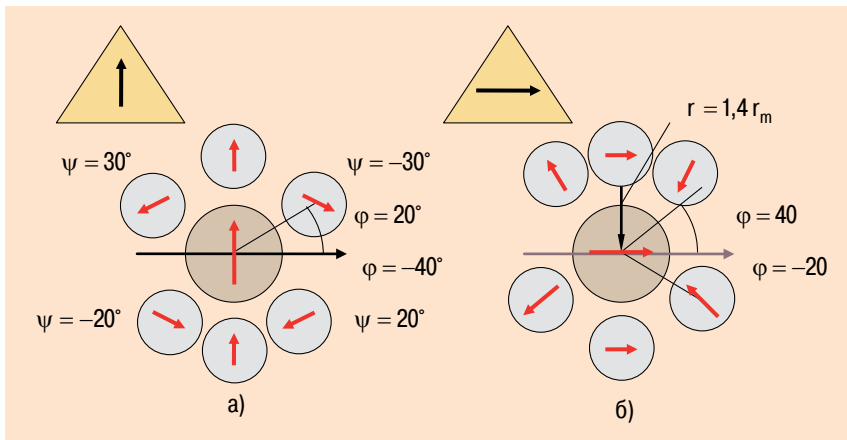


Рис. 6. Расчетная дифракционная картина в дальней зоне УО при падении на него света линейной поляризацией: а – для вертикальной ориентации вектора E относительно УО; б – для горизонтальной ориентации вектора E (φ – угол в полярной системе координат; ψ – азимут поляризационного эллипса)

ВЛИЯНИЕ СДВИГА ФАЗ ПРИ ОТРАЖЕНИИ НА ДИФРАКЦИОННУЮ КАРТИНУ

Как уже говорилось, дифракционная картина в дальней зоне существенно зависит от сдвига фаз ортогональных компонент при отражении, который определяется видом покрытия граней УО. Например, при полном внутреннем отражении (в выбранной системе координат): $\delta \approx -40^\circ$; при металлическом покрытии граней: $\delta = 150^\circ - 170^\circ$; при интерференционном покрытии сдвиг фаз можно плавно изменять в широких пределах от 0 до 180° . Таким образом, все типы УО должны классифицироваться по сдвигу фаз компонент на каждой грани $\delta_A, \delta_B, \delta_C$. Определенной комбинации δ_i соответствует определенная дифракционная картина в дальней зоне.

Результаты расчета дифракционной картины в зависимости от сдвига фаз ортогональных компонент на гранях УО для линейного горизонтального состояния поляризации падающего света приведены в таблице.

Эксперименты полностью подтверждают приведенные дифракционные картины. Типичными являются картины под номером 2 (полное внутреннее отражение) и под номером 8 (металлическое покрытие).

Отметим, что при нулевом сдвиге фаз $\delta_A = \delta_B = \delta_C = 0^\circ$ (в выбранной системе координат) в центре картины отсутствует цен-

тральное пятно. В этом случае поляризационные свойства УО сводятся к действию так называемо-

Дифракционная картина в дальней зоне

1. Сдвиг фазы $\delta = -60^\circ$ 	2. Сдвиг фазы $\delta = -42^\circ$
3. Сдвиг фазы $\delta = 0^\circ$ 	4. Сдвиг фазы $\delta = 20^\circ$
5. Сдвиг фазы $\delta = 45^\circ$ 	6. Сдвиг фазы $\delta = 60^\circ$
7. Сдвиг фазы $\delta = 90^\circ$ 	8. Сдвиг фазы $\delta = 120^\circ$

го поляризационного вращателя, который поворачивает плоскость поляризации падающего света на определенный угол. Это угол различается для секторов, и на выходе луча из секторов 1–6 имеет соответственно угол поворота: $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ, 0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$.

Покрытие с *любым* сдвигом фазы может быть спроектировано на базе тонких диэлектрических слоев, напыляемых на отражающие грани УО. Первый диэлектрический слой, примыкающий к поверхности призмы, должен иметь показатель преломления больше, чем материал призмы, например, $n = 2$; при контакте последнего слоя с воздухом всегда наблюдается полное внутреннее отражение, так что потери в идеале отсутствуют. Поэтому на всех УО с диэ-

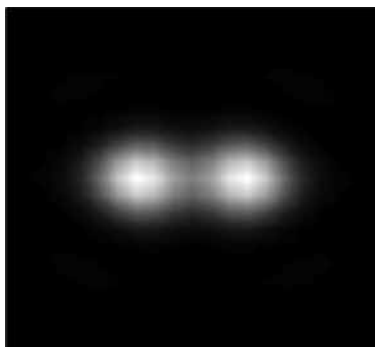


Рис. 7. Распределение суммарной интенсивности в дальней зоне

электрическим покрытием происходит полное внутреннее отражение; только в отличие от УО без покрытия, многолучевая интерференция приводит к дополнительному сдвигу фаз между ортогональными компонентами.

Особый интерес представляют уголкового отражатели с *комбинированным* покрытием граней. Рассмотрим УО, одна грань которого имеет такое покрытие, что сдвиг фаз ортогональных компонент вектора E составляет около 180° (металлическое или специальное диэлектрическое покрытие), а две других не имеют напыления, т. е. на них наблюдается полное внутреннее отражение.

В этом случае распределение суммарной интенсивности

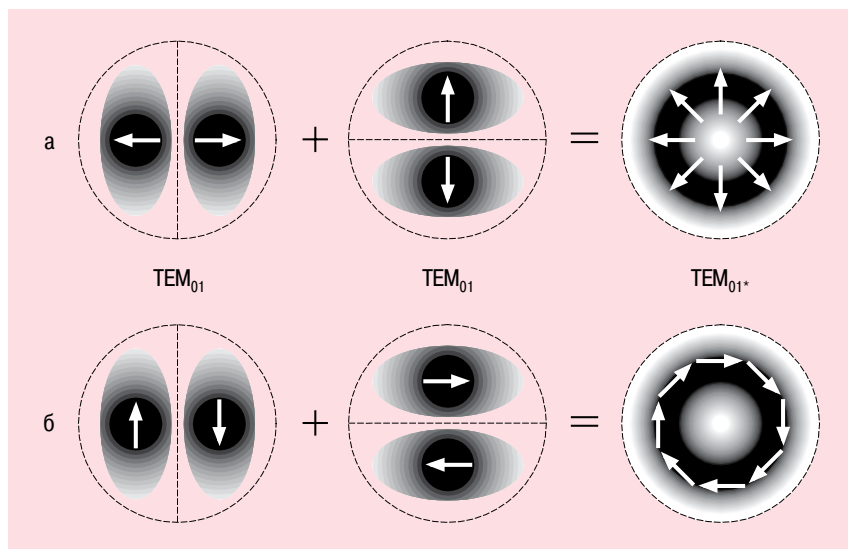


Рис. 8. Класс пучков со сложной осесимметричной поляризационной структурой: а – радиально-поляризованный пучок; б – азимутально-поляризованный

в дальней зоне имеет вид двух пятен (рис.7). Если через центры пятен провести линию, то ее направление ориентировано вдоль грани УО с напылением. В центральной части дифракционной картины состояние поляризации отраженного света эквивалентно падающему, а на периферии пятен является ортогональным. Угловое расстояние от центра этих пятен до центра картины составляет около 4 угл. секунд.

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-СИММЕТРИЧНЫЕ ПУЧКИ

Если вычислить по отдельности сумму всех компонент $E_{xi}^{вых}$ и $E_{yi}^{вых}$ для света, отраженного от УО в ближней зоне, то поляризационные переменные $\Gamma^{вых}$ и $\Gamma^{вх}$ равны между собой ($\Gamma^{вых} = E_{yi}^{вых} / E_{xi}^{вых}$ и $\Gamma^{вх} = E_{yi}^{вх} / E_{xi}^{вх}$). Например, если на УО падает плоская волна с линейной горизонтальной поляризацией, то *сумма* всех $E_{yi}^{вых}$ равна нулю.

Интересно, что при нулевом сдвиге фаз $\delta = 0^\circ$ на всех отражающих гранях сумма как $E_{yi}^{вых}$, так и $E_{xi}^{вых}$ равна *нулю*, независимо от состояния поляризации падающего света! Вообще такие пучки образуют отдельный класс пучков со сложной, но симметричной поляризационной структурой. Примером являются осесимметричные пучки (рис.8) [8].

На рис.9 показана поляризационная структура пучка, отраженного от УО в ближней (рис.9 а,б) и дальней зоне (рис.9 в,г), при этом на отражающие поверхности УО нанесены диэлектрические пленки так, чтобы сдвиг фаз между ортогональными компонентами был равен нулю. Состояние поляризации падающего излучения линейное горизонтальное (рис.9 а,в) и вертикальное (рис.9 б,г).

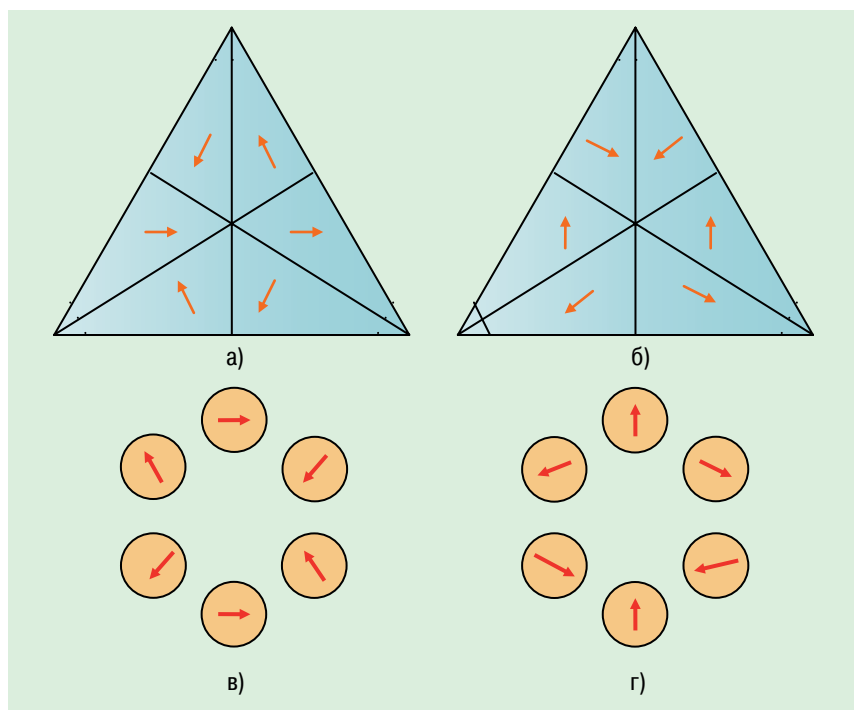


Рис. 9. Поляризационная структура пучка, отраженного от УО: а,б – в ближней зоне; в,г – в дальней зоне

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы компьютерной оптики. / Под. ред. В.А.Сойфера. – М.: Физматлит, 2003.
2. **John J. Degnan.** – Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review. Contribution of Space Geodesy to Geodynamics: Technology, 1997, v. 25, p. 133.
3. **Коротаев В.В., Панков Э.Д.** – Оптико-механическая промышленность, 1981, № 1, с. 9.
4. **Денисюк Г.В., Корнеев В.И.** – Оптико-механическая промышленность, 1982, № 9, с. 1.
5. **Садовников М.А., Соколов А.Л.** – Оптика и спектроскопия, 2009, т. 107, № 2, с. 213.
6. **Садовников М.А, Соколов А.Л., Шаргородский В.Д.** – Успехи современной радиоэлектроники, 2009, № 8, с. 55 .
7. **Соколов А.Л.** – Оптический журнал, 2008, т. 75, № 2, с. 16.
8. **Нестеров А.В., Низьев В.Г., Соколов А.Л.** – Оптика и спектроскопия, 2001, т. 90, № 6, с. 1018.



ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМОБИЛЬ БУДУЩЕГО

Проект «автомобиль будущего» ставит амбициозные задачи перед наукой и промышленностью: сохранить достигнутый уровень рабочих параметров при повышенной безопасности, обеспечить большой комфорт и снизить расход горючего. При этом оптические технологии вносят главный вклад в прогресс автомобилестроения, в частности в новые производственные технологии создания альтернативных двигателей для транспортных средств, систем подсветки и освещения. На выставке «LASER World of PHOTONICS 2011» продукты и технологии, предназначенные для будущего общественного транспорта, экспонируются в зонах «Лазеры и лазерные системы для машиностроительных производств» и «Зеленая фотоника».

Производители автомобилей используют большое количество лазерно-оптических технологий – например, для резки и сварки листового металла лучом CO₂- или твердотельных лазеров при изготовлении кузовов. В дальнейшем доля оптических технологий в машиностроении будет только расти. В частности, современные лазерные производственные системы все шире используются при изготовлении облегченных конструкций и обработке пластика. Кроме того, все больше оптических систем встраивается в сам автомобиль. Примером могут служить "умные" системы освещения, которые существенно увеличивают безопасность при движении в любых погодных условиях и любых дорожных ситуациях.

ЛАЗЕРЫ В МОТОРОСТРОЕНИИ

Автомобильная индустрия уделяет особое внимание созданию более эффективных двигателей внутреннего сгорания и альтернативных моторов. Лазерно-оптические технологии предоставляют много возможностей для оптимизации уже существующих систем. Так, например, лазерные технологии изготовления элементов трансмиссии сокращают потери на трение

при передаче мощности (от мотора) и, кроме того, позволяют снизить массу отдельных компонентов этой системы. Использование лазерных технологий в итоге снижает уровень вредных выбросов автомобиля и улучшает передачу вращающего момента элементами трансмиссии.

В ближайшем будущем для снижения массы (автомобиля) при сохранении необходимой жесткости и стабильности формы в его конструкции будут широко применяться элементы из пластика, усиленных углеродными нитями. Изготовление таких элементов является весьма трудной задачей, на решение которой сейчас направлены усилия многочисленных научных и отраслевых исследовательских институтов. Фраунгоферский институт лазерной техники (ILT, Aachen) представит на своем стенде прорывное достижение в этой области. Используя в качестве модели "Tesla Roadster V2.5 Sport", ILT продемонстрирует новые технологии изготовления элементов конструкции автомобиля, в частности процессы микросоединений в деталях гибридного двигателя и сварки при изготовлении литиевых батарей. Применение новых двигателей будет постоянно изменять техноло-

гии автомобилестроения, а использование новых комбинаций материалов и систематическая борьба за снижение веса будут требовать новых лазерных технологий.

БОЛЬШЕ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НОВЫХ КОНЦЕПЦИЙ ДВИГАТЕЛЯ

Производство электроавтомобилей или автомобилей с гибридными двигателями ставит перед технологами весьма трудные задачи, так как необходимо научиться соединять термочувствительные материалы – например, внутри ионно-литиевых батарей. Благодаря появлению новых высокомошных источников лазерного излучения – таких, как ультракороткоимпульсные лазеры и волоконные лазеры с большой мощностью излучения – именно лазерные технологии оказались пригодными для реализации потенциала ресурсосбережения при изготовлении новых автомобилей, для обеспечения их экологической чистоты и снижения энергозатрат в автомобильном транспорте в целом.

Основным трендом в производстве батарей для электроавтомобилей сегодня является изготовление сборок, объединяющих несколько ионно-литиевых аккумуляторов. Главной проблемой при этом является соединение разнородных материалов – алюминия и меди. Используя импульсные твердотельные лазеры для получения жестких соединений методом лазерной сварки или лазерной пайки, удастся обеспечить гораздо более эффективные и надежные контакты, чем при механическом соединении (крепления болтами).

Промышленность уже не может обходиться без лазеров и при

производстве гибридных автомобилей. Лазерные технологии используются для соединения различных компонентов в топливных ячейках. Промышленные методы, объединенные названием "Зеленые решения", будут представлены кооперацией Института металлообрабатывающих станков и промышленного менеджмента (IWB) Технического университета Мюнхена и Баварского лазерного центра (BLZ) в рамках специального шоу «Фотоны в промышленности».

ЛАЗЕРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ

Лазерные методы соединения в автомобилестроении заменили традиционные виды сварки уже несколько лет назад. Хотя на протяжении достаточно длинного периода времени сварка лучом CO₂-лазера конкурировала с электро-сваркой, появление следующего поколения технологических лазеров стало триумфом внедрения лазерной сварки в кузовное производство. Дисковые твердотельные лазеры с диодной накачкой уже активно используются для резки и раскроя тонкого металлического листа. Сварка такими лазерами, как выяснилось, дает при производстве элементов кузова, например дверей, заметно лучшие, чем традиционные методы, результаты: из-за меньшей механической и термической нагрузки на материал во время сварки и большей прочности образующегося соединения сварные швы получаются более тонкими. В результате удается изготавливать более легкие кузова и, соответственно, более эффективные с точки зрения расхода горючего автомобили.

На выставке в разделе «Лазеры и лазерные системы для машиностроения» компания TRUMPF будет демонстрировать инновационные установки на основе твердотельных лазеров для дистанционной сварки в автомобилестроении. Высокое качество луча обеспечивает возможность его точной фокусировки в рабочую зону даже с больших расстояний, поэтому лазеры нового поколения могут гибко использоваться в различных производственных системах. Кроме того,

дисковый лазер с диодной накачкой затрачивает на одну точечную сварку 0,4 с и обеспечивает в пять раз более высокую скорость работы, чем обычная установка для точечной электросварки.

Лазерную систему для обработки материалов с принципиально новым схмотехническим решением представит фирма «Erlas Erlanger Lasertechnik». Система является гибридной, лазер с волоконным выводом излучения комбинируется в ней с оптическим сканером, формируя многоосевую, очень гибкую систему транспортировки луча. Оптический сканер фокусирует лазерный луч на обрабатываемой детали, существенно сокращая время, обычно требуемое на взаимное позиционирование лазерной головки и детали, что увеличивает пропускную способность установки. В результате, например, становится гораздо более эффективной сварка компонентов с большим количеством сварных швов – а это весьма часто встречающаяся в автомобилестроении операция.

ЛАЗЕРЫ И ОСВЕЩЕНИЕ

Автомобильная промышленность использует сегодня новое световое оборудование, чтобы увеличить дальность действия автомобильных фар и расстояние видности автомобильных огней. Светодиодами (LED) заменяют сейчас

обычные лампочки внутри автомобиля. Некоторые производители автомобилей высокого класса уже начинают предлагать автомобильные фары, использующие только LED-источники. "Умные" системы освещения могут подстраивать формируемый световой конус под угол наклона кузова – перемещая LED-модули или изменяя в зависимости от условий видимости рассеиватели света, чтобы уменьшить обратную засветку от тумана или дождя.

Одним из главных достоинств светоизлучающих диодов является их высокая энергетическая эффективность. 98% потребляемой ими электроэнергии превращается в видимый свет. Однако использование их в автомобилях предопределено другими характеристиками. LED являются точечными источниками света, обладающими очень большой яркостью даже при малых размерах испускающей свет площадки. Поскольку углом расходимости светового луча, испускаемого светодиодами, можно управлять, открываются разнообразные инновационные возможности использования этого источника света.

Всю информацию о Конгрессе можно найти на сайте www.photonics-congress.com.

*Е.Фомина, «Мессе Мюнхен Консалтинг»,
www.messe-muenchen.ru*