

# ОПТИМАЛЬНАЯ КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОПТИКИ

Н. Л. Истомина, д. ф.-м. н., Л. В. Калякина, АО "РИЦ "ТЕХНОСФЕРА", photonics.su, Москва, Россия



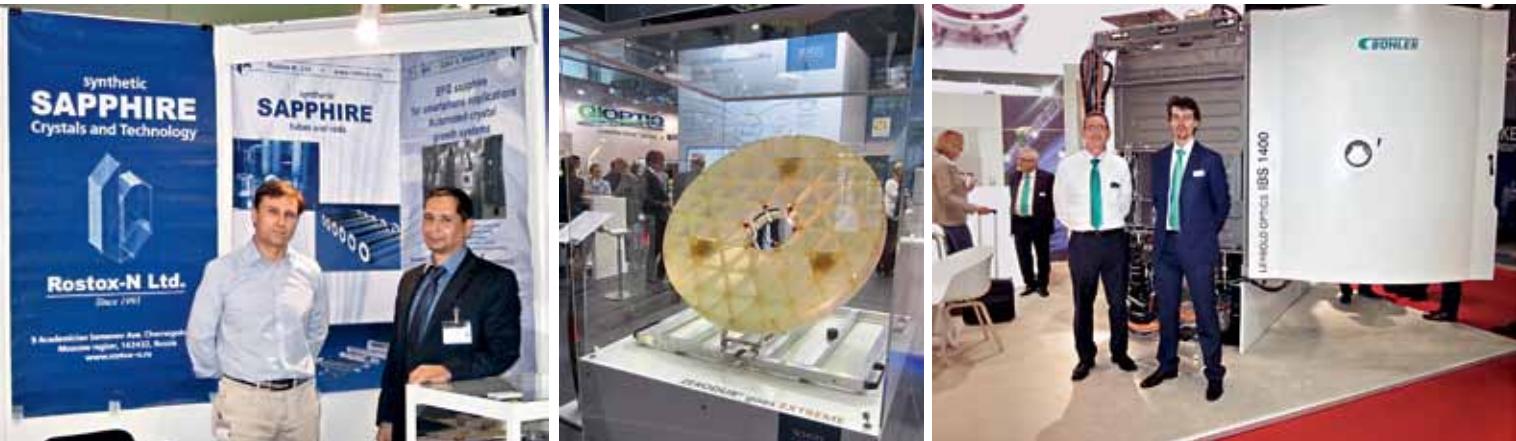
Бесспорно, Германия является лидером в производстве прецизионной оптики, а выставка Optatec – отражением движения идей и технических решений в этой области. По представленной экспозиции Optatec-2018 можно уловить дух современной технической мысли, но построить прогноз развития оптического станкостроения нельзя. Попробуем обосновать такое утверждение.

Международная выставка инновационных оптических технологий, компонентов, систем и технологий производства Optatec-2018 прошла в Германии во Франкфурте-на-Майне с 15 по 17 мая 2018 года. Нынешняя выставка является уже четырнадцатой по счету. Наполнение выставки отражало современное состояние оптической промышленности, оптических элементов и тесно связанных с ними технологий. Фаворитами выставки Optatec-2018 стали цилиндрические линзы и оборудование для их производства и тестирования.

Если девизом предыдущей выставки 2016 года можно было бы провозгласить фразу "Великолепная возможность наблюдать проникновение инноваций вакуумной, электронной и фотонной технологий в структуру новейших машин", то лозунгом выставки 2018 года можно было бы назвать "Выбор оптимальной кинематики движения". Появилась

потребность в иных материалах, но уникального оборудования для обработки оптических материалов широкого спектра от стекла до поликарбоната не создано. Рынок замер, а игроки еще не приняли решения, нащупывают свой путь, присматриваясь к продукции друг друга. Так кто же станет законодателем новых стандартов оптического производства?

Прежде производители станков для оптических деталей шли по пути увеличения производительности оптической продукции, но в условиях высокой конкуренции, царящей на рынке оптико-механической продукции, многие компании изменили концепцию своего бизнеса. Они перешли от массового производства однотипных оптических элементов к направлению гибкого производства для малых и средних партий прецизионных оптических деталей или одноразовых продуктов. Заказчиками подобных изделий высту-



пают астрономы и пользователи микроскопии и офтальмологических инструментов. Хотя от массового производства никто пока не отказывается.

По-прежнему самые крупные участники выставки – компании, создающие станки для традиционных технологий формования оптических элементов: сферических и асферических линз, оптических призм, зеркал. Станки для формообразования и шлифовки под полировку сферических, асферических, торических поверхностей и оптических деталей с поверхностями свободной формы, станки для грубой, тонкой и тончайшей полировки представили компании OptoTech, Satisloh, Schneider Optical Machines. Вспомним старое правило: размер площади, занятой компанией под свою экспозицию, свидетельствует о ее финансовом состоянии. Тогда любопытно отметить, что на выставке Optatec-2018 компания OptoTech увеличила свою и без того занимаемую ранее большую площадь. Стенд Satisloh сохранил свои размеры, расположившись около форума, где проходила деловая программа. Более скромную, но все же одну из самых больших площадей выставочного павильона заняло оборудование компании Shneider.

Эти крупные компании реализуют концепцию объединения в одном станке нескольких технологий полировки и доводки: полировки шаровым инструментом, активной жидкостно-напорной доводки, полировки мембранным инструментом, полировки на смоле, эксцентриковым пятаком. Компания OptoTech двигается дальше, захватывая все новые технологические ниши для увеличения возможностей своего оборудования. В про-

дуктовой линейке OptoTech прочные позиции занял станок для полировки высокоапертурных линз, которые оказались высоко востребованными на рынке. Практика показала и правильность принятия другого решения – внедрения в оборудование технологии нанесения тонких оптических покрытий в среде глубокого вакуума. Так как функции фильтров, светоделительных пластин, поляризаторов и зеркал находятся в сильной зависимости не только от качества поверхности изготавливаемых деталей, но и от качества нанесенного покрытия, то установка OAC-75F приобретает все большую популярность (ее прототип OAC-60F был представлен еще два года назад). Недалеко и до установки ионного полирования. Среди новинок был представлен станок ZPA 1500 CNC для полирования цилиндрических линз большого размера.

Учитывая интерес потребителей к изделиям из сапфира, компании создали машины для формообразования оптики не только из стекол, но и из сапфира, цедура (ситалла) и поликарбоната. Schneider Optical Machines представил линейку станков, уже зарекомендовавших себя на производстве (SLC-80 и CLC-302 – станки для центрирования, CLP-80 – станок для полировки), и станки нового поколения (станки для полировки сферической CLP-120 и асферической ALP-120 оптики). Станок SLC-80 предназначен для серийного производства линз небольшого диаметра, и выбор линз, а также их установка в станок доверены роботу.

Появление новых материалов привело на рынок оптического станкостроения новых игроков. Так компания DMC MORI



выпустила станки линейки ULTRASONIC для изготовления деталей сложной формы из цедура (ситалла), сапфира, оксида хрома, оксида алюминия, кварца, карбida кремния. В станки интегрирована технология ULTRASONIC, разработанная для производства деталей из металла. Технология Ultrasonic представляет собой наложение ультразвуковых колебаний на вращение инструмента, благодаря чему инструмент, установленный во вращающемся шпинделе, совершает колебания с амплитудой 10–15 мкм. Таким образом, снижается вероятность роста микротрещин при механической обработке, улучшается качество поверхности обрабатываемого изделия, увеличивается скорость обработки, а также продлевается срок службы инструмента. Технология была изобретена в 1985 году, а с 2001 года используется в компании DMG MORI.

Инженеры ищут оптимальную кинематику движения двух инструментальных шпинделей. Традиционные станки для формообразования оптических деталей имеют только линейные оси. Частота вращения инструментальных шпинделей достигает 20000 об/мин. Возникло революционное предложение расположить инструментальные шпинтели при формообразовании и полировке оптических деталей свободной формы иначе. Такая идея реализована компанией Fives в станке TTG-350 для полировки оптических поверхностей свободной формы. Этот станок имеет две вертикальные оси вращения, а также линейные оси их взаимного движения и может выполнять любые перемещения. По представлению инженеров компании Fives такое распо-

ложение шпинделей имеет многообещающие перспективы.

Соответственно популярностью пользуется оборудование, необходимое для тестирования углов оптических призм, зеркал и клиньев, механических напряжений. По сравнению с прошлой выставкой возросло число участников, которые представляли приборы для тестирования оптических элементов и иных метрологических задач. Разнообразие гибких измерительных решений для производства деталей с точными асферическими поверхностями, линз с поверхностью свободной формы и оптических волокон обеспечивает производственные процессы на всех этапах. От контроля качества поверхности и ее формы до спектрального пропускания, от измерения напряжений до измерения шероховатости, от оценки разрешения готовых объективов до установок центрирования – все производители подобного оборудования ощутили интерес посетителей к своей продукции.

Напомним, что в ноябре 2018 года в Париже на Генеральной конференции по весам и мерам будет пересчитан этalon килограмма. Этalon килограмма является важным элементом для определения массы. Его определение вот уже 129 лет базируется на цилиндре, изготовленном из платины и иридия – Международный этalon Килограмма (International International of Poids et Mesures – BIPM) хранится в Париже. Но этот килограмм более не соответствует требованиям, предъявляемым к нему современными технологиями. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) выступает за представление единичного килограмма на основе нового стандарта – монокри-



сталлической изотопно-обогащенной сферы высокочистого кремния-28. Интерферометрические методы измеряют геометрию кремниевой сферы, что позволяет точно определить ее объем.

Всего в выставочном форуме было представлено 540 экспонентов из 32 стран. Из них большую долю заняли измерительные системы и модули для установок напыления оптических покрытий. Многослойные тонкопленочные покрытия – просветляющие, фильтрующие, зеркальные, поляризующие, светоделительные – придают оптическим изделиям дополнительные функциональные свойства. Надежность работы прецизионной оптики напрямую связана с воспроизводимостью параметров технологических процессов нанесения пленок. Проблемы высокотехнологичного оборудования вызваны неравномерностью характеристик пленок, наносимых на подложки большого диаметра вплоть до 300 мм. По сравнению с Optatec-2016 в этом году возросло число компаний-разработчиков установок для нанесения покрытий и отдельных модулей для них. Новичок на этом рынке – американская фирма Plasma Process Group, представившая модули источников плазмы. Компании предлагают системы ионно-плазменного напыления, вакуумные установки ионно-плазменной полировки. Для борьбы с загрязнениями используется модульная конструкция оборудования: источники плазмы, магнетроны-распылители с различными материалами, способные работать непрерывно несколько недель, обеспечивая рост разнообразных диэлектрических, металлических и гибридных слоев из нескольких материалов со скоростью

около 10 нм/сек. Некоторые компании-интеграторы вакуумного оборудования для нанесения покрытий на подложки использовали выставку для поиска производителей модулей, среди таких – немецкая компания Beam Tec.

Специалистам известно, что физические характеристики оптических деталей зависят от множества факторов. При создании покрытий методом электронно-лучевого испарения на дисперсию пленки влияют чистота материала мишени, условия поддержания вакуума в камере, нагрев подложек, скорость вращения деталей. Компании соревнуются между собой в достижении низкой шероховатости и уникальной однородности пленок, создании камеры с диаметром, позволяющим найти оптимальное соотношение между равномерностью нанесения пленок и повышением производительности. Швейцарский концерн Buhler, поглотивший в 2012 году фирму Leybold Optics GmbH, известную в индустрии оптических покрытий, представил установки ионно-лучевого напыления с вакуумной камерой диаметром 1400 или 1600 мм. Эти системы оснащены трехсеточной радиочастотной ионной пушкой и обеспечивают равномерное осаждение покрытий на подложки диаметром до 600 мм. Системы ионно-лучевой полировки / травления Leybold Optics IBF предназначены для обработки подложек диаметром от 200 до 1200 мм.

От покрытий требуется не только обеспечивать стабильность полосы спектрального пропускания, но и сохранять дифференциацию коэффициентов отражения и пропускания для разных поляризационных составляющих. Ощущается определенный голод на измери-





тельное оборудование, способное работать в цеховых условиях с высокой воспроизводимостью результатов измерений. Именно таким задачам отвечают спектрофотометры белорусской компании EssentOptics. Приборы серии PHOTON RT способны определять коэффициенты пропускания и абсолютного зеркального отражения плоских и сферических компонентов в диапазоне длин волн от 185 до 5200 нм, охватывая УФ-, видимый и ИК-диапазоны. Кинематическая схема работы прибора позволяет автоматически выполнять угловые измерения от 0° до 75° по пропусканию и от 8° до 75° по отражению с шагом 0,01 градуса, не вынимая детали из камеры.

Компании-производители напылительного оборудования представили продукцию, которую можно получать на их уникальных установках. Так за счет нанесения мономолекулярной пленки можно коренным образом изменить свойства поверхности, придавая ей гидрофобные качества вместе с высокой механической прочностью. Подобные гидрофобные стекла, создаваемые с помощью нанесения на стекло однородных мономолекулярных пленок, экспонировала белорусская компания Izovac. Среди ее новинок – вакуумная напылительная установка Lidiz для покрытий с низким рассеиванием и высокой лучевой стойкостью, в таких покрытиях нуждается лазерная оптика.

На выставке Izovac предоставил возможность ознакомиться с функционалом и работоспособностью системы контроля процессов нанесения оптических покрытий для различных видов вакуумного технологического оборудования. Система работает в полностью автоматическом

режиме в широком спектральном диапазоне с разрешением 0,3 нм.

Значительно меньше в этом году во Франкфурте оказалось производителей сапфира. Если на выставке Optatec-2016 почти три десятка компаний из Литвы, Израиля, России, Германии, Китая позиционировали себя как производителей сапфирового материала и деталей из него, то на выставке Optatec-2018 их было в десять раз меньше. Прежде прогнозировался бурный рост спроса на этот материал, особенно со стороны полупроводниковой промышленности. В сапфире уникальным образом сочетаются превосходные оптические свойства (материал прозрачен в диапазоне от 0,18 до 6 мкм), физические свойства (анизотропное поведение из-за гексагональной кристаллической структуры, высокая стабильность диэлектрической постоянной) и химическая стойкость к агрессивным средам. Однако ожидаемого бурного роста выпуска светоизлучающих диодов на основе нитрида галлия LED не случилось, и отпала необходимость в массовом выпуске сапфировых подложек. В Китае, по словам специалистов, простаивает почти 75% заводов, построенных для роста сапфировых булей. Большие були, которые они выращивали, невозможно разрезать на малые изделия. На рынке остались только компании, зарекомендовавшие себя высоким качеством изделий и умением создавать ноу-хау для высокотехнологичных применений.

Среди компаний, оставшихся на рынке, фирма легендарной Елены Добринской – Rubicon Technology, которая выпускает сапфир высокой чистоты для окон наблюдения, российская фирма ROSTOX-N. Гибкость про-





изводства и умение находить применение сапфировым изделиям позволили ROSTOX-N удержать свои позиции на рынке производства изделий из сапфира. Умение базируется на технологии выращивания кристаллов в виде ленты длиной до 700 мм, при этом время выращивания не превышает 24 часа.

Интерес к сапфиру неожиданно упал, зато резко вырос спрос на оптику для ИК-диапазона, это видно по числу производителей оптики для ИК-диапазона. Соответственно увеличился спрос и на материалы кремния, селенида цинка и германия. Заметно возросло число поставщиков этих материалов и изделий из них. В их ряду прочные позиции занимает российская компания "Кристалл Техно" (это международное название компании "Электростекло") – крупный производитель кристаллов для ИК-оптики (селенида цинка, сульфида цинка, кремния, сапфира) и изделий из них. Кроме умения выращивать материалы для ИК-области спектра, компания владеет рядом ноу-хау, среди которых технология обработки полусферы и гиперсферы. Пока изделия такой формы востребованы в больших количествах.

На Optatec-2018 лишь небольшое число компаний в сравнении с выставкой 2016 года представляли производство дифракционных решеток. Очевидно дело в том, что интерес спектроскопии сместился в терагерцевую область, а это предполагает уже другую конструкцию диспергирующих элементов. Компании-производители плоских и выпуклых решеток, а также объемных решеток были поглощены крупными компаниями-производителями лазеров, лазерного оборудования и спутникового приборостроения, кото-

рое, как известно, нуждается в облегченных оптических элементах широкого функционала. Уникальный терагерцевый спектрометр экспонировала компания TYDEX.

Среди участников экспозиции мы встретили четыре российских компании: TYDEX, "Баспик", ROSTOX-N и "Электростекло". Компания "Электростекло" ("Кристалл Техно") постоянный участник выставки со дня ее основания. На ее стенде были представлены кристаллы для ИК-оптики (селенида цинка, сульфида цинка, кремния, сапфира) и изделия из них. Новой продукцией компании ROSTOX на этот раз стали сапфировые чехлы для термопар. Так как термопару из вольфрама не рекомендуется нагревать выше 1000 °C в атмосферной среде из-за процессов окисления, то внутри сапфирового чехла можно создать условия вакуума или наполнить его инертным газом.

TYDEX в ряду со своей уникальной продукцией, среди которой, например, CVD-ZnSe двоякофокусные цилиндрические линзы для резки толстых материалов или высокоточные зеркала и полные зеркально-линзовые комплекты для профессиональных астрономических систем, представил новую разработку – импульсный терагерцевый спектрометр. Ключевыми особенностями прибора компании являются высокая выходная мощность генерируемого ТГц-излучения (почти 300 мкВт) и коэффициент преобразования сигнала из оптического в ТГц-диапазон  $10^{-4}$ . "Баспик" экспонировал детектирующее устройство на основе микроканальных пластин, в котором усиление сигнала достигает значения  $10^6$ – $10^7$ , а амплитудное разрешение 0,97.





Интересно было услышать мнение участников. Об изделиях, экспонируемых компанией "Баспик" на выставке Optatec рассказали руководитель офиса перспективных проектов (ОПП) компании Кулова Нина Сослановна и заместитель руководителя ОПП "Баспик" Рыжков Александр Александрович.

Мы изучаем возможность применения наших пластин для медицинской диагностики. К настоящему моменту у нас разработан диагностический прибор, с помощью которого можно исследовать различные биологические структуры. Любая задача, связанная с молекулярно-биологическим анализом, нацелена на определение структуры исследуемого объекта. Определив структуру, мы можем делать диагностические выводы (например, можно работать над задачей поиска генетических мутаций). Мы создали систему, в которой наши пластины используются как сменный биочип для анализа. На биочип наносятся исследуемые вещества. Это могут быть как участки ДНК, так и участки белков. Кроме того, микроканальная пластина входит в стационарную часть при-

**Компания "Баспик"** расположена во Владикавказе и известна своей уникальной продукцией – микроканальными пластинами, необходимым элементом электронно-оптических преобразователей и некоторых типов научно-исследовательской аппаратуры, в том числе для космических исследований. Условия работы микроканальных пластин – это вакuum, только эти условия подходят для детектирования электронов, заряженных частиц и УФ-излучения с длиной волны от 400 нм и менее. Номенклатура изготавливаемых изделий достаточно широкая: детектирующие устройства, микроканальные пластины разной формы и различающимся шагом структуры, с диапазоном варьирования диаметров каналов от 3 до 15 мкм. В качестве материала для подложек используется стекло, а поверхность металлизируется. Производство ведется по собственной уникальной технологии компании "Баспик", позволяющей обеспечивать высокую воспроизводимость технологического процесса, например, разброс значений диаметра канала составляет десятые доли процента. "Баспик" известна своим участием в создании фотонных детекторов для исследования протон-протонных столкновений в детекторе ATLAS Большого адронного коллайдера, в создании исследовательской аппаратуры проекта Parker Solar Probe, стартующего летом 31 июля 2018 года. Проект Parker Solar Probe реализуется NASA для наблюдения солнечной короны в межпланетном пространстве и ее сверхзвукового расширения, называемого "солнечным ветром", и разгадки коронарного нагрева и ускорения "солнечного ветра".





бора: она установлена в детекторе, где оптические сигналы преобразуются в электрические. Использование биочипов – это быстрый и экономичный способ детектирования оптических сигналов.

Работа экспонируемой системы очень похожа на работу прибора ночного видения. Здесь тоже регистрируются слабые оптические сигналы, которые затем усиливаются, после чего производится их количественная оценка. Достижимый коэффициент усиления –  $10^3 - 10^4$ . Прибор может применяться для неинвазивной клинической диагностики, а также для различных молекулярно-биологических научных исследований.

Оптический отклик в виде квантов света от исследуемого вещества, улавливаемых с помощью микроканальных пластин, возникает в ходе определенной химической реакции. Поэтому необходимо добавить катализатор, который способствует возникновению квантов света. Прибор можно использовать для изучения реакций растений – мы видим его возможности для применения в агроселекции.

Среди представленных экспонатов – детектирующее устройство, состоящее из фотокатода и сборки двух микроканальных пластин. В нем достигается усиление сигнала от  $10^6$  до  $10^7$ , а амплитудное разрешение – менее 100%. Амплитудное разрешение отличается от привычного технического параметра сигнал/шум. Соотношение сигнал/шум – это параметр, который характеризует шумовые свойства микроканальной пластины (МКП) или другой аппаратуры, работающей в аналоговом режиме. При работе в режиме счета для оценки технических возможностей устройства требуется получить амплитудное распределение. При накоплении сигнала мы получаем некоторое распределение величины сигнала по шкале энергий во времени,



среднее значение которой соответствует наиболее вероятной величине сигнала.

Если рассмотреть отношение ширины распределения к высоте пика, то чем меньше разброс, тем выше вероятность получение этого сигнала. Амплитудное разрешение позволяет количественно оценить вариацию сигнала и в представляемом нами изделии составляет 97%. Плотность скорости счета темновых импульсов является также важным параметром, который характеризует ложные срабатывания. В данном случае эта величина составляет 0,4 импульса/сек с площади в  $1 \text{ см}^2$ , что является достаточно низким показателем ложных срабатываний.

*Надеемся, что наши уникальные изделия заинтересуют посетителей выставки.*

Выставка Optatec проходит во Франкфурте каждые два года. Прогресс и развитие технологий идут быстрыми темпами: если в текущем году у какой-то компании появилось ноу-хау, то уже через 2 года можно обнаружить, как несколько фирм продвигают эту идею. Каждый



год выставка обновляется на 30–40%, постоянно происходит приток новых компаний. В этом году выставка Optatec оказалась немного меньше, чем предыдущая. Вообще с точки зрения количества участников, наблюдается стагнация. Некоторые компании приехали на Optatec-2018 на один день, без стенда, как посетители. Среди участников выставки большинство – это немецкие и китайские компании.

Что касается новинок, то на выставке Optatec-2018 их было представлено достаточно много. О фаворитах выставки (цилиндрических линзах и их обработке) мы говорили выше, теперь о новинках в области функциональных покрытий. В связи с появлением новых проектных норм в 5 нм в производстве транзисторов среди создателей оптики для литографии началась гонка. Вслед за уменьшением проектных норм стремительно меняются источники излучения: на смену ртутным лампам пришли эксимерные ArF-лазеры, а теперь и им подошла замена – плазма, свечение которой используют для области глубокого ультрафиолета (EUF).

Однако в EUF-литографии для формирования пучков нельзя использовать линзовую оптику – можно использовать только зеркала. Следовательно, появились новые технологические решения – многослойные интерференционные брэгговские зеркала. Если в видимом диапазоне и ИК-области интерференционные покрытия работают с прозрачными материалами, то в EUF-области они используются как отражатели. Идет поиск оптимальной последовательности слоев для зеркал, формирующих пучок, падающий на фотрезист. При этом важно соблюдать сочетание двух условий: для интерференционных слоев покрытия оптики необходимо достичь максимального коэффици-



ента отражения актиничного излучения, а для маскирующего покрытия фотошаблона – минимального коэффициента отражения (чем больше коэффициент отражения актиничного излучения покрытием, тем выше вероятность увеличения размера элемента топологии).

Результаты многих исследовательских групп показали, что комбинация Mo/Si-слоев для зеркал дает наилучшее покрытие с коэффициентом отражения 0,75. Но с этой комбинацией в литографии может быть использовано только излучение с  $\lambda=13,5$  мкм. Такую длину волны дает свечение плазмы, созданной из ионов лития или ионов олова. Однако обнаружено, что плазму ионов Li<sup>+2</sup> трудно поддерживать, а плазма ионов олова Sn<sup>+8</sup>-Sn<sup>+13</sup> загрязняет и разрушает EUF-оптику. При этом Li можно убрать нагревом оптики, а олово таким способом убрать нельзя, его способна устраниć с поверхности зеркал только струя водорода.

Пока идет поиск источников, совместимых с Mo, и оптимальных методов создания плазмы





(лазерной или разрядной), разработчики ищут новые оптимальные комбинации слоев для зеркал, способных выдерживать тепловую нагрузку. Другая продукция, также связанная с повышенным спросом на вакуумное технологическое оборудование – это перестраиваемые фильтры. Пространственно-переменные покрытия, в которых центральная длина волны пропускания зависит от линейного или углового положения подложки, используются в создании перестраиваемых фильтров для широкого диапазона длин волн. Эти фильтры стали альтернативой дифракционным решеткам.

Преимущество решеток в широком диапазоне значений дисперсии и высокой светоэффективности нивелируется широким углом охвата главных максимумов, который требует использования детекторов с большим размером приемной площадки. Поэтому решетки не могут применяться там, где важна компактность.

Обычные переменные фильтры получают путем наклона подложки на некоторый угол во время осаждения (чем больше толщина слоя вдоль длины подложки, тем дальше сдвигается центральная  $\lambda$  фильтра). Однако ширина пропускания фильтра зависит от изменения  $\lambda$  центральной полосы. Например, в видимом диапазоне (400 – 700 нм) FWHM равен 6 нм при  $\lambda=400$  нм, а на 700 нм выше – 10,5 нм. REO-технология компании IDEX (США) позволяет изготавливать чрезвычайно маленькие фильтры размером ниже 1 мм. Их используют в конструкции приборов распознавания гиперспектральных изображений (для ближнего УФ- и ИК-диапазона), в волоконных датчиках смещения длины волны на основе брэгговских решеток, на основе фотонных кристаллов.

Есть фильтры с переменным радиусом для лазерных отражательных зеркал, фильтры с ради-



ально-переменной плотностью для формирования радиального профиля интенсивности пучка.

Другие новинки выставки были связаны с обработкой материалов. Так как сапфир является твердым веществом, то требуется еще более твердый материал для его обработки – алмазный инструмент. Интерес представляет решение задачи крепления алмазного наконечника к инструменту. Алмазные инструменты изготавливаются на разных связках. Самый популярный сплав – медь с никелем. Алмаз внедряется в этот сплав и удерживается. В процессе выработки алмаз стачивается и затем удаляется. Особыми методами крепления алмазного инструмента владеет компания Contour Fine Tooling.

Об этом, об особых лазерных стержнях для генерации излучения в ИК-диапазоне, созданных путем спекания кристаллов YAG, Nd:YAG и V:YAG, мы расскажем в продолжении обзора. Уделим внимание компонентам оптомеханики, волоконной оптики, оптическим измерительным системам, поскольку без метрологического обеспечения производство оптики невозможно.

