Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Доктор техн. наук *Э. И. Голованевский*,
В. Н. Чарнецкий
(Ленинградский горный ин-т)

Проникающая во все области техники электроника в последнее десятилетие растет и развивается на основе применения синтезированных кристаллов и минералов, что в особенности относится к новейшему направлению этой области — лазерной технике.

Фундаментальные работы старейшей горной школы в области кристаллографии, сверхчистых металлов и полупроводников, синтеза минералов, с одной стороны, и замечательные свойства лазеров, их высокая когерентность, направленность и концентрация энергии излучения, с другой, являются твердой основой взаимодействия горногеологических работ и лазерной техники.

Рассмотрим три группы исследований: 1) лазеры в маркшейдерии и шахтостроении; 2) лазеры при разработке горных выработок; 3) кристаллы и минералы, управляющие лучами лазеров.

К первой группе относятся проведенные в 1965—1966 гг. перспективные теоретические и экспериментальные исследования по применению когерентных источников электромагнитных волн оптического диапазона в приборах задания направления проходки в вертикальных, наклонных и горизонтальных выработках в условиях запыленной атмосферы или дождей и туманов.

Методы шахтного строительства и разработки месторождений открытым способом существенно изменяются и совершенствуются; растут глубины шахтных стволов, скорости движения подъемных механизмов — все это предъявляет более высокие требования к точности задания направления при проходке шахтных стволов. Одной из ошибок, ограничивающих точность геометрического ориентирования проходки, является отклонение отвесов от вертикального положения.

Проведенные исследования должны были выяснить возможность применения оптических квантовых генераторов для разработки удобных в эксплуатации маркшейдерских приборов, обладающих нужной точностью.

Постановка этих работ была оправдана уже тем, что лазеры в результате высокой направленности позволяют проще решать задачи создания быстродействующих дальномеров и указателей направления, обеспечивая бо́льшие точности, чем средства микроволновой радиолокации или обычные оптические приборы с некогерентными источниками

света. В настоящее время лазеры с высокой точностью решают проблемы космической геодезии, осуществляя точное слежение за спутниками Земли.

Для определения условий применения лазерных указателей направлений в маркшейдерских работах необходимо исследовать поглощение и рассеивание лазерного излучения на различных аэрозолях, отличающихся составом, концентрацией, формами и размерами частиц по отношению к длине волны распространяющегося излучения. Теоретические работы [1, 4] могли дать количественные ответы лишь при малых и больших по сравнению с длиной волны размерах частиц. Поэтому свойства сред с различной концентрацией аэрозолей и размерами частиц, соизмеримыми с длиной волны, анализировались экспериментально на специально созданных моделях запыленных сред.

Ввиду *больших скоростей падения аэрозольных частиц в неподвижной* воздушной среде исследования на первом этапе велись на статической модели и модели с иммерсионной жидкостью с аэрозольными включениями. Статическая модель представляла собой область сечением 50 $см^2$ и протяженностью 125 *см* с навесными аэрозольными частицами. Затухание измерялось на миллиметровой длине волны (8 *мм*), а взвешенные угольные частицы имели соизмеримые с волной размеры. В соответствии с созданием аналога реальных условий расстояние между частицами было существенно больше длины волны, обеспечивая отсутствие многократного рассеивания.

В жидкостной модели вязкость и плотность обеспечивали медленные скорости падения аэрозольных частиц в жидкости. Такие скорости позволяли измерять затухание в оптическом диапазоне при распространении излучения лазера через кювету с аэрозольной жидкостью. Турбулентные движения в выбранной жидкости не должны были вносить в измерения погрешность вследствие нарушения структуры распространяющегося в ней лазерного луча. Исследование ряда жидкостей показало, что в качестве иммерсионной среды можно выбрать α-бромнафталин, в котором явления динамического двойного лучепреломления исчезали через 3—5 *сек* после прекращения действия внесенного турбулентного возмущения.

Жидкостная аэрозольная модель — кювета длиной 10 *см* при разных концентрациях включений моделировала эквивалентную трассу распространения длиной от 100 до 1500 *м*. В качестве аэрозольных в модели использовались частицы окиси железа диаметром 2 *мкм*.

Простота и малые габариты этих моделей позволяли проводить предварительные исследования. Однако реальным условиям шахтной атмосферы полностью соответствовал только аэродинамический способ моделирования. Аэродинамическая модель состояла из измерительной трубы, через которую протягивался воздух с аэрозольным включением. Скорость воздуха и концентрация аэрозолей измерялись непосредственно при исследовании затухания проходящего излучения. Измерения велись в оптическом диапазоне с лазером на волне 6328Å, а для изучения затухания во всем видимом диапазоне использовался источник с монохроматором.

Системы лабораторных моделей, разработанные для исследования распространения электромагнитных волн в воздушных средах с аэрозольными включениями, позволяли определить значительное количество коэффициентов поглощения в зависимости от концентрации, характера материала, форм и размеров аэрозольных включений.

При создании лазерных указателей направлений важным являлись вопросы точности получения угловых координат, анализ методов их определения и построения оптических систем для когерентных источников оптических излучений.

Расходимость лазерного луча, распределение излучения в сечении его диаграммы направленности и интенсивность максимума исследовались для конфокального резонатора лазера в зависимости от юстировки зеркал. Одновременно создавалась оптическая система обращенного телескопа, существенно уменьшавшая (в 25 раз) угол расходимости лазерного излучения. Для вертикальных направлений оптическая система лазера включала пентапризму.

Улучшенная направленность лазерного луча составила 10^{-4} *рад*, что оказалось в 5 раз хуже дифракционного предела направленности, но определило принципиальную возможность дальнейшего повышения точности лазерных визиров. Для исследования увеличения возможной точности были рассмотрены различные методы локации по направлению, отличающиеся сложностью и точностью определения направления, например, локация по максимуму излучения, по равносигнальной зоне и др.

Для повышения дальности и точности лазерного указателя направления на основе фотоэлектронного умножителя была создана аппаратура объективной регистрации излучения и последующего усиления электрических сигналов. Испытания макета лазерного указателя направления (совместно с ВНИМИ) были начаты на воздушной линии горизонтального визирования над землей на расстояниях 1800—2000 *м*, точность визирования соответствовала расчетной и даже при визировании по максимуму диаграммы ошибка была меньше 20 угловых секунд; естественно, что точность визирования могла бы быть повышена при применении метода равносигнальной зоны.

С целью определения условий прохождения светового пучка лазерного указателя направления в стволах при строительстве шахт и установления требований к прибору для задания горизонтальных и вертикальных направлений проводились испытания в горизонтальном штреке шахты комбината «Сланцы». Чистота атмосферы в шахтах этого типа обеспечивала прохождение луча без заметного ослабления, и дальность действия не ограничивалась. Макет лазерного указателя направления надежно работал и после длительной транспортировки на автомашине.

Дальнейшие испытания проводились в глубоких стволах шахт треста Донецкшахтострой. На дальность распространения лазерного луча в глубоких вертикальных стволах существенно влиял приток воды в виде осадков. Так, в шахте Петровская Глубокая с глубиной горизонта 905 *м* приток составлял 9 $м^3/ч$, в этих условиях световая марка лазерного указателя наблюдалась до глубины 350 *м*. На шахте Петровскуголь комбината Донецкуголь глубиной 575 *м* приток составлял 4 $м^3/ч$, в этих условиях лазерный пучок наблюдался на максимальной глубине.

Комплекс исследований доказал, что лазерные указатели направлений просты в обращении и обеспечивают достаточно высокую точность. В работе был использован гелий-неоновый лазер типа ЛАК, мощность которого не превышает 4—5 *мвт*. Эксперименты показали, что такая мощность излучения для визирования в глубоких шахтных стволах недостаточна. Применение промышленных лазеров ЛГ-38 мощностью 100 *мвт* существенно увеличит глубину визирования. В условиях рассеяния и поглощения излучения потоками «дождя» лучшие результаты следует ожидать на зеленой линии спектра.

Лазерные указатели направлений перспективны при проведении разработок полезных ископаемых открытым способом, где они могут использоваться для управления механизмами на расстоянии по заданной программе, а также для маркшейдерских работ в шахтостроении,

если их мощность излучения и принятая спектральная линия обеспечат обнаружение излучения на нужных расстояниях и глубинах. Об этих работах было доложено на семинаре по применению ОКГ в народном хозяйстве.

Материалы исследований были переданы во Всесоюзный маркшейдерский институт, который разработал образцы лазерных указателей направления.

Вторую группу представляют исследования возможности дистанционного разрушения горных пород на принципах локализации в относительно малых объемах больших плотностей электромагнитной энергии лазерного излучения видимого или инфракрасного диапазонов.

В труднодоступных областях горных выработок может оказаться целесообразным передавать энергию излучения на расстояние с последующей ее концентрацией на объектах локального нагрева. Такую задачу можно решить, установив мощный лазерный источник на значительном расстоянии от места взаимодействия его излучения с горной породой. Для уменьшения расходимости у источника лазерного излучения следует установить обращенную телескопическую систему, а для увеличения концентрации энергии ближе к области взаимодействия на допустимом расстоянии от места локального нагрева — концентратор энергии.

Оптические системы формирования лазерного излучения могут анализироваться квазиволновыми методами [3] или методом геометрической оптики. Первые требуют знания всех данных резонатора, в том числе и тех, которые не приводятся в паспортных данных лазеров; второй может проводиться на основе только паспортных данных лазеров. Он и был положен в основу расчетов. Уравнения крайних расходящихся лучей лазера позволили получить величину минимального диаметра лазерного луча в области взаимодействия

$$d_{\min} = \frac{af}{L - f}$$

и расстояние от линзы концентратора до области минимального сечения

$$l = \frac{f}{1 - \frac{f}{L}}$$

при условии, что расстояние от лазера до концентратора удовлетворяет соотношению

$$L = \frac{D - a}{2\operatorname{tg}\alpha},$$

где a — диаметр излучающего пятна на зеркале лазера; α — угол расходимости излучения относительно оптической оси системы; D, f — соответственно диаметр и фокусное расстояние линзы-концентратора.

Применяя лазер с насадкой обращенного телескопа, расстояние до концентратора следует отсчитывать от ее выходного отверстия, определяя его по формуле

$$L = \frac{D - \Gamma a}{2\operatorname{tg}\frac{\alpha}{\Gamma}},$$

где Γ — отношение фокусных расстояний линз телескопа.

Анализ потерь излучения лазера на волне 6943 Å в оптической системе и атмосфере показал, что они могут достигать 25% от излучаемого потока энергии, а в условиях концентрированных аэрозолей в атмосфере существенно превосходить эту величину.

Дистанционный нагрев осуществим при импульсном и непрерывном источниках лазерного излучения. При первом режиме энергия лазера разогревает лишь облученную область, так как явления теплопередачи развиться не успевают; во втором случае при расчете температур следует учитывать распространение тепла за границы облучаемой области. В 1965 г. в лаборатории был проведен предварительный эксперимент по дистанционному нагреву детонаторов для определения возможности взрывания пород на расстояниях без применения проводников. В этих опытах использовался сконструированный в лаборатории импульсный сравнительно маломощный лазер на рубине ($\lambda = 6943$ Å) с размерами кристалла 100 *мм* в длину и 11 *мм* в диаметре; его энергия излучения не превышала 1 *дж*. Без применения дополнительных фокусирующих средств детонатор взрывался на расстоянии 3,5 *м*; при применении одной линзы-концентратора $f = 300$ *мм* дистанция возрастала до 5,5 *м*.

В настоящее время мощности лазеров гигантских импульсов составляют десятки и сотни мегаватт, а мощность непрерывного излучения газовых лазеров инфракрасного излучения достигает десятков киловатт при приемлемом коэффициенте полезного действия (около 10%). Такие уровни мощности позволяют предполагать, что дальнейший поиск в создании устройств дистанционного нагрева и разрушения горных пород с помощью лазерного нагрева целесообразен.

Третью группу составляют исследования по применению синтезированных кристаллов и минералов к управлению излучением лазеров.

Управление лазерным лучом является новым направлением в технике, которое развивается учеными многих стран.

Использование лазерных систем типа «Дисплей» в современных ЭЦВМ позволит решить многочисленные народнохозяйственные проблемы. Лазерные системы этого типа найдут применение и в автоматизированных системах управления горными и металлургическими предприятиями, а также при решении других горногеологических задач.

Наиболее прогрессивным путем решения проблемы управления лучом являются исследования электрооптических кристаллов, совершенствование их параметров и качества в процессах роста, поиск новых синтезируемых материалов с высокими электрооптическими модулями.

Исследования по применению электрооптики в лазерной технике представляют интерес для кафедр Института, изучающих кристаллы и минералы, условия их природного образования и искусственного синтеза.

Электрооптические материалы открывают возможность создания устройств, управляющих направлением луча лазера с непрерывным отклонением оптического луча. Движение светового луча аналогично движению электронного луча, управляемого электрическим или магнитным полями в электроннолучевых трубках.

Применение управляемого электронного луча в электроннолучевых приборах поставило технику измерения на качественно новую ступень, открыло возможности создания телевидения и многих других технических приложений. Еще большие перспективы откроются перед техникой, когда будут решены вопросы эффективного управления световыми лучами лазеров и рисующие лучи выйдут из ограниченных

объемов вакуумных приборов в свободное пространство, существенно расширив границы применения их в технических устройствах.

В основе непрерывного отклонения лежит принцип электрооптической рефракции оптического излучения в кристалле. Величина рефракции и угол отклонения луча пропорциональны градиенту показателя преломления в кристалле, возникающего при приложении внешнего электрического поля. По результатам различных конструктивных вариантов отклоняющих электрооптических ячеек можно получить общее соотношение для максимального разрешения отклоняющей рефракционной системы

$$N_{\max} = \frac{L\,U\,D_{л}\,n_0^3\,r_{63}}{1{,}22\lambda\,a\,b},$$

где $N_{\max}$ — число разрешаемых лучей за один цикл развертки; L — длина пути луча в электрооптической среде; n_0 — показатель преломления; U — амплитуда управляющего напряжения; $D_{л}$ — диаметр луча в электрооптической среде; λ — излучаемая волна; a, b — размеры поперечного сечения, электрооптической среды; r_{63} — электрооптический модуль кристалла.

Высокими оптическими качествами и электрооптической однородностью обладают кристаллы дигидрофосфата калия, электрооптический модуль которых зависит от абсолютной температуры (по закону Кюри—Вейса $r_{63} = 10^{-9}$ *см/в* при температуре 300° К); углы отклонения и величина разрешения $N_{\max}$ малы для использования в технических устройствах.

Вблизи точки Кюри разрешающая способность отклоняющего устройства существенно возрастает, однако для постоянства его параметров требуется высокая стабильность поддержания низких температур. Анализ показывает, что на кристаллах дигидрофосфата калия устройства плавного отклонения недостаточно перспективны.

Отметим наиболее актуальные направления в синтезировании электрооптических кристаллов, создание которых существенно улучшит системы управления лазерными лучами. Следующим после дигидрофосфата калия (кристалла KDP) является кристалл DKDP, в котором водород замещен дейтерием и модуль r_{63} в 2 раза превосходит модуль KDP. Достигнуты хорошие результаты по промышленному освоению дейтерированных кристаллов высокого оптического качества. Далее, среди водорастворимых кристаллов обращает на себя внимание кристалл DCDA (CsH_2AsO_4), управляющие свойства которого на порядок превосходят свойства кристалла KDP. То же можно сказать о кристалле ниобата лития ($LiNbO_3$) из группы пировскитов, выращиваемого из раствора в расплаве; из кристаллов этой группы еще большими электрооптическими модулями обладает титанат бария ($BaTiO_3$).

Среди кристаллов кубических классов, которые могут быть ценными для электрооптического управления лучами лазера, следует отметить кристаллы теллурита цинка (ZnTe).

Особенно заманчивы сложные твердые растворы типа KTN в составе $KTa_xNb_{1-x}O_3$, в таком кристалле точка Кюри—Вейса находится на уровне 300° К и напряжения управления электрооптическим эффектом составляют примерно 50 *в*, т. е. кристаллы превосходят KDP по управляющему напряжению более чем на два порядка.

Это далеко не полный перечень перспективных кристаллов, технология выращивания которых еще не позволяет получить кристаллы высокой однородности и нужных размеров.

Использование кристаллов KTN в рассмотренных устройствах позволит решить задачу плавного отклонения без применения низких температур.

Существенные трудности в создании устройств плавного отклонения лазерных лучей с имеющимися кристаллами вызвали повышенный интерес к устройствам дискретного отклонения лазерных лучей [2], которые имеют преимущества перед плавным отклонением.

Дискретное отклоняющее устройство состоит из n последовательных отклоняющих ячеек, каждая из которых обеспечивает различные поперечные или угловые смещения луча в нарастающей дискретной последовательности d, $2d$, $4d$, ..., $2^{n-1}d$ или, соответственно, Θ, 2Θ, 4Θ, ..., $2^{n-1}\Theta$.

Для отклонения в двух направлениях кроме первой есть вторая система отклонения для смещения лучей во взаимно перпендикулярной плоскости. Каждая ячейка состоит из электрооптического кристалла — переключателя поляризации и пластины или призмы двойного лучепреломления. При приложении к кристаллу управляющего напряжения линейная поляризация падающего света изменяется на взаимно перпендикулярную и луч света смещается в кристалле двойного лучепреломления на заданную дискретную величину.

В устройствах дискретного отклонения наряду с большим разрешением лучей света (на 2^n лучей при n последовательных каскадах отклонения) наблюдается высокая оптическая точность отклонения, не зависящая от нестабильности амплитуд управляющих напряжений.

Луч лазера в дискретных устройствах управляется двоичным кодом, хранимым в памяти ЭЦВМ, и его движение может происходить по любой заданной программе. Единство кристаллографии, лазерной техники и вычислительной математики определяет особую ценность дискретных систем отклонения.

В основу таких устройств положена ясная идея. Однако на пути ее реализации встречаются существенные трудности: получение высокой прозрачности элементов дискретной системы; разработка устройств компенсации и подавления фоновых помех; исследование систем электронного управления для достижения минимума мощности управления; создание совершенных оптических схем; разработка вопросов оптимального управления лучом с помощью ЭЦВМ; создание хроматических систем, управляющих многими линиями излучения (цветами) лазера.

Выполнение всего комплекса исследований позволило решить проблему управления лучом на кристаллах дигидрофосфата калия.

Широкое внедрение систем управления лазерным лучом тесно связано с успехами в кристаллооптике, выращиванием электрооптических кристаллов с пониженными напряжениями управления и малой инерционностью, созданием искусственных синтезированных оптических материалов из кристаллического кварца и исландского шпата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. ИИЛ, 1961.
2. Голованевский Э. И., Коновалова С. А., Кононов А. А. Устройство дискретного отклонения лазерного луча на призмах Волластона. «Оптика и спектроскопия», т. XXVI, вып. 2, 1969.
3. Когельник и Ли. Резонаторы и световые лучи. ТИИЭРЭ, 1966, № 10.
4. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. ГИТТЛ, 1951.