Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

Ю. В. Гуляев, М. А. Казарян, Ю. М. Мокрушин, О. В. Шакин, *Квантовая электроника*, 2015, том 45, номер 4, 283–300

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
http://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 82.200.70.124
15 мая 2017 г., 12:07:41

ОБЗОР

PACS 42.79.Jq; 43.35.Sx; 42.55.Lt

Акустооптические лазерные проекционные системы отображения телевизионной информации

Ю.В.Гуляев, М.А.Казарян, Ю.М.Мокрушин, О.В.Шакин

Дан обзор различных способов формирования с помощью лазеров телевизионного изображения на проекционных экранах больших размеров. Представлены результаты теоретического и экспериментального исследований акустооптической проекционной системы, работающей по принципу проекции изображения всей амплитудно-модулированной телевизионной строки за один импульс излучения лазера. Рассмотрены особенности формирования изображения в такой системе и требования к ее отдельным элементам. Особое внимание уделено нелинейным искажениям в сигнале изображения, которые наиболее сильно проявляются на низких частотах модулирующего сигнала. Обсуждаются вопросы улучшения эффективности и качества формируемого изображения с помощью акустооптических модуляторов и импульсных лазеров. Проекторы с импульсным методом формирования строки, работающие в реальном масштабе времени, можно использовать для управления лазерным излучением высокой интенсивности.

Ключевые слова: *акустооптические модуляторы и дефлекторы, акустооптическое взаимодействие, импульсные твердотельные лазеры, лазеры на парах металлов, кристалл парателлурита.*

1. Введение

Создание устройств, способных отображать большой объем информации при высоком качестве воспроизводимого изображения представляет практический интерес в таких областях науки и техники, как оптическая обработка информации, запись информации на различные виды носителей, воспроизведение телевизионных изображений, связь и др., где мы имеем дело с большими потоками информации в реальном масштабе времени.

В настоящее время большие усилия ведущих электронных компаний мира направлены на создание телевизионных систем отображения информации с использованием лазерных источников света. Лазеры обеспечивают высокую яркость и недостижимый для ламп и люминофоров цветовой контраст в изображении. Среди лазерных источников выделяются импульсные лазеры, позволяющие осуществлять эффективное нелинейное преобразование излучения в другие участки видимого спектра и, таким образом, охватить весь существующий для зрительного восприятия диапазон длин волн. Одним из перспективных методов формирования изображения в реальном масштабе времени с помощью этих лазеров является метод импульсной проекции изображения амплитудно-модулированной ультразвуковой строки, которая заполняет апертуру акустооптического модулятора.

В рассматриваемом способе модуляции отсутствует высокоскоростная развертка по строке, а также, в отличие от существующих методов, в которых используются матричные модуляторы, нет дискретной структуры в изображении. Оно формируется в реальном времени без задержки и лучше согласуется с последовательным способом передачи информации по каналу связи. Размеры изображения при этом могут легко трансформироваться без изменения самих устройств модуляции. При записи информации на различные виды носителей имеется возможность когерентной оптической обработки этой информации. Возможность использования полностью акустооптических устройств управления для рассматриваемой системы позволяет для целого ряда задач отказаться от таких механических устройств управления, как зеркальные сканаторы, многогранные вращающиеся призмы, матрицы и линейки микрозеркал. Кроме того, используемые в системе кристаллические среды модуляторов могут выдерживать большие средние и импульсные мощности лазерного излучения, что позволяет прменять рассматриваемые системы в технологических целях.

Несмотря на то что импульсной метод формирования изображения давно известен, существует много нерешенных вопросов, связанных с эффективностью и качеством формирования изображения с помощью наиболее эффективных в настоящее время акустооптических модуляторов (АОМ) на основе кристалла парателлурита (TeO_2) при амплитудной модуляции ультразвука. Сложность задачи заключается в том, что акустооптическую дифракцию необходимо рассматривать для анизотропной гиротропной среды, которой является кристалл TeO_2, и для промежуточного режима дифракции света на звуке. Необходимо также дать оценку перспектив практического применения данного метода для отображения полноцвет-

Ю.В.Гуляев. Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7; e-mail: gulyaev@cplire.ru
М.А.Казарян. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: kazarmishik@yahoo.com
Ю.М.Мокрушин. ОАО «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова», Россия, 196641 С.-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, 3; e-mail: yrmok@yandex.ru
О.В.Шакин. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26

Поступила в редакцию 27 февраля 2014 г., после доработки – 16 мая 2014 г.

ной телевизионной информации на больших экранах в стандарте высокой четкости.

В настоящее время наиболее перспективными для формирования изображения импульсным методом представляются лазеры на парах металлов, в частности лазер на парах меди, а также неодимовые лазеры с преобразованием излучения во вторую гармонику. При этом большое значение имеет вопрос об оптимизации соответствующих выходных параметров этих лазеров.

2. Развитие лазерных телевизионных устройств отображения информации

Одной из первых работ по реализации телевизионной системы отображения информации с использованием лазера была работа Корпела и др. [1]. В этой работе в качестве светового пучка использовалось непрерывное излучение He–Ne-лазера. Модулятором служила ультразвуковая ячейка на воде, в которой возбуждалась акустическая волна с частотой $f = 41.5$ МГц. Остановка движения строки на экране осуществлялась акустооптическим дефлектором (АОД) на воде, отклонявшим падающий на него модулированный световой пучок в сторону, противоположную той, куда перемещалась картина на экране. Развертка по кадру производилась с помощью зеркального электромагнитного гальванометра. При полосе частот видеоканала 3.15 МГц данная система позволяла получать 200 элементов разрешения по строке. АОМы на воде, используемые в первых экспериментах, из-за большого акустического затухания (1.5 дБ/см при $f = 30$ МГц) работали на довольно низких частотах ультразвука, что не позволяло получать широкую полосу модулирующих частот видеоканала. Кроме того, при работе с большими мощностями ультразвукового сигнала срок службы таких ячеек был невелик.

В первых телевизионных устройствах с разверткой лазерного луча использовались непрерывные лазеры на инертных газах: аргоне (λ = 476.5, 514.5 и 488.0 нм) и криптоне ($\lambda = 647.1$ нм), которые могли генерировать одномодовое выходное излучение мощностью в несколько ватт. Пик развития этих систем приходится на 70–80-е гг. [2]. В таких устройствах излучение аргонового или криптонового лазера модулируется по интенсивности акустооптическим [3, 4] или электрооптическим [5–8] модулятором и отклоняется последовательно по строке и кадру с помощью АОДов [4, 7–10] или систем оптико-механических разверток, представляющих собой вращающиеся зеркальные барабаны [5, 11, 12], многогранные призмы [7], а также гальванометры [7, 12] и биморфные элементы [6].

К основным параметрам, характеризующим работу системы отображения информации с непрерывной разверткой светового луча, относятся число разрешимых элементов по строке, определяемое произведением ширины полосы модулирующих частот видеоканала на длительность строки, несущей информацию, а также число разрешимых строк в кадре. Эти параметры определяются характеристиками используемых в системе пространственных модуляторов и дефлекторов светового излучения. Выбор способов модуляции и отклонения светового луча зависит от требований, предъявляемых к конкретной системе отображения или записи информации. В области низких ($\leqslant 10$ МГц) модулирующих частот АОМы превосходят по своим параметрам электрооптические модуляторы (ЭОМ) [13]. Последние имеют преимущества на более высоких частотах модуляции. С помощью АОМа можно получить больший, чем с использованием ЭОМа, коэффициент передачи контраста на низких частотах.

Оптико-механические дефлекторы использовались в тех случаях, когда требуется получить цветное изображение с малыми световыми потерями и высоким разрешением по строке и по кадру. Поскольку дисперсия в подобных системах отсутствует, для них не существует проблемы сведения цветов на экране. Их недостатки – инерционность, сложность обеспечения необходимых точности и стабильности отклонения световых пучков, чувствительность к механическим вибрациям. Для устраненя этих недостатков применялись сложные системы автоподстройки, а также высокоскоростные синхронные двигатели с магнитными и газодинамическими подвесами [12]. АОДы с успехом использовались в менее дорогих системах для получения одноцветного изображения [7]. Они привлекают внимание простотой управления положением светового пучка, малыми размерами и отсутствием механически перемещающихся деталей.

Высшим достижением в области создания лазерных телевизионных систем отображения информации с использованием непрерывных лазеров явилось цветное воспроизводящее устройство, разработанное японскими фирмами NHK и Hitachi для телевидения повышенной четкости [2, 12]. Это устройство позволяло отображать 1125 линий по высоте изображения и имело полосу пропускания тракта видеосигнала до 30 МГц. При суммарной мощности источников лазерного излучения 6 Вт (4 Вт – аргоновый лазер, 2 Вт – криптоновый) система давала возможность получать высококачественное изображение на экране площадью 3 м^2. При коэффициенте усиления экрана, равном 4, яркость изображения на нем составила 37.6 кд/м^2. Несмотря на высокое качество формируемого изображения эти устройства не получили широкого распространения из-за низкого КПД (0.05%) использовавшихся лазерных источников света.

Одним из самых слабых звеньев механической системы разверток телевизионного изображения с непрерывными источниками света является высокоскоростной вращающийся многогранный зеркальный барабан, который формирует строку. Скорости вращения этих барабанов достигают (30–60) $\times$ 10^3 об./мин. К качеству изготовления этих устройств предъявляются очень высокие требования.

Большие сложности при формировании равномерной линейной развертки изображения по строке возникают также и при использовании акустооптических дефлекторов непрерывного лазерного излучения [2].

Для устранения высокоскоростной развертки в 1974 г. было предложено реализовать акустооптическую систему с импульсной проекцией телевизионного изображения на основе лазера [14]. Эта система являлась модернизацией разработанной в 1938–1939 гг. английской фирмой Scophony [15, 16] телевизионной установки, в которой источником света являлась мощная ртутная лампа, а модулятором служила жидкостная ультразвуковая ячейка. На рис.1 представлена оптическая схема этого устройства.

Частота следования импульсов излучения лазера должна была равняться частоте телевизионных строк, а длина ячейки

$$L = T_{\rm str}v, \qquad (1)$$

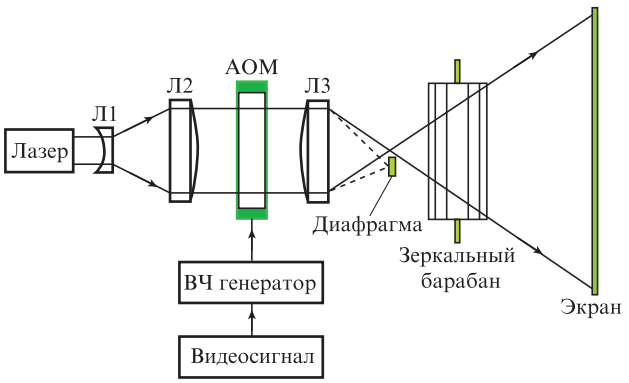


Рис.1. Оптическая схема акустооптической телевизионной системы с импульсным лазером.

где T_{str} – «длительность» строки, несущей информацию; v – скорость звука в материале АОМа.

При этом каждый световой импульс после дифракции на ультразвуковой волне и прохождения через оптическую проекционную систему должен был давать на экране изображение строки. Для получения резкого изображения длительность светового импульса должна быть меньше или равна времени перемещения одного разрешимого элемента изображения в звукопроводе модулятора. Для такой системы общее число разрешимых элементов в строке приближенно можно определить выражением

$$N_{str} \simeq \frac{T_{str}}{\tau + \tau_0} \simeq \frac{T_{str}\Delta f_0}{1 + \tau_0 \Delta f_0}, \qquad (2)$$

где τ – «длительность» одного разрешимого элемента; τ_0 – длительность светового импульса; Δf_0 – полоса частот модулирующего сигнала.

Из выражения (2) видно, что для получения 300 разрешимых элементов в строке при $T_{str} = 60$ мкс и $\Delta f_0 = 6$ МГц необходимо, чтобы $\tau_0 \leqslant 30$ нс. Частота следования световых импульсов должна равняться частоте строчной развертки (15.625 кГц для системы SECAM) при высоких средней мощности и направленности излучения.

В патенте [14] предлагалось использовать Nd:YAG-лазер, работающий в режиме модуляции добротности с частотой следования, равной частоте телевизионных строк. Переход в видимый диапазон длин волн предполагалось реализовать посредством преобразования частоты излучения во вторую гармонику в нелинейном кристалле иодистого лития. Развертка по кадру в таком устройстве должна была осуществляться с помощью зеркального барабана. В качестве среды акустооптического взаимодействия предлагалось использовать кристалл α-HJO_3, скорость распространения ультразвука в котором равна 2.44×10^5 см/с, при существенно меньшем коэффициенте затухания, чем у воды. При такой скорости длина кристалла для «записи» целой телевизионной строки должна была равняться 15.5 см. В работе [14] указывалось, что, используя излучение основных цветов (синего (B), зеленого (G) и красного (R)) на длинах волн λ_B, λ_G и λ_R в соответствующих мощностных пропорциях, можно построить цветное, воспроизводящее телевизионное изображение устройство с помощью одного акустооптического пространственного модулятора света. Для этого нужно возбудить в АОМе ультразвуковые волны на частотах f_B, f_G и f_R, удовлетворяющих условию

$$\lambda_B f_B = \lambda_G f_G = \lambda_R f_R = 2\sin\theta_B, \qquad (3)$$

где θ_B – угол падения светового пучка на модулятор, равный углу Брэгга. При таком условии изображения на этих длинах волн будут совмещены. Автором патента [14] была предпринята попытка практической реализации предложенного устройства, но технические возможности того времени (несоответствие параметров импульсного излучения требованиям импульсного метода проекции), а также отсутствие подходящих акустооптических кристаллов не позволили ее осуществить. Так, Nd:YAG-лазер генерировал световые импульсы длительностью 0.2 мкс с частотой следования 300 Гц, а длина акустооптической ячейки составляла всего 1/10 часть от требуемой.

Дальнейшее развитие импульсный метод формирования телевизионного изображения получил с появлением мощных импульсно-периодических лазеров видимого диапазона длин волн: лазеров на парах металлов (меди, золота и т.д.), а также Nd:YAG-лазеров с модуляцией добротности и удвоением частоты. Кроме того, были синтезированы высокоэффективные акустооптические кристаллы с малыми скоростями распространения в них звуковых колебаний по определенным кристаллографическим направлениям (TeO_2, Hg_2Cl_2) и размерами, позволяющими разместить в звукопроводе стандартную телевизионную строку ($T_{str} = 52$ мкс).

Хорошие результаты по созданию одноцветной телевизионной системы с импульсным лазером на парах меди были достигнуты в Англии [17] и России [18, 19]. В [20, 21] описывается система, работающая по тому же принципу, что и в [17, 19], в которой в качестве основного применялся импульсный Nd:YAG-лазер с ламповой накачкой, работающий в режиме модуляции добротности с преобразованием излучения во вторую гармонику. Средняя выходная мощность этого лазера на $\lambda_G = 532$ нм составляла 16 Вт. Излучение трех таких лазеров использовалось для получения трех основных цветов полноцветного лазерного телевизионного изображения. Для получения зеленого цвета применялся один лазер ($\lambda_G = 532$ нм, $P_G = 16$ Вт). Для получения красного цвета использовался лазер на красителе с накачкой излучением второго Nd:YAG-лазера с удвоением частоты ($\lambda_R = 615$ нм, $P_R = 15$ Вт). Синий цвет был получен в лазере на $Al_2O_3:Ti^{3+}$ с удвоением частоты и накачкой излучением третьего Nd:YAG- лазера с удвоением частоты ($\lambda_B = 450$ нм, $P_B = 6$ Вт). Данная система работала в стандарте NTSC и формировала цветное телевизионное изображение на экране размером 3.6 × 4.8 м. Длительность импульсов генерации лазеров составляла 100 нс, что не давало возможности получить высокое разрешение в телевизионном проекторе по строке. В публикации [22] сообщалось об увеличении средней выходной мощности синего излучения до 7 Вт ($\tau_0 = 80$ нс, частота следования импульсов $f_{rep} = 17$ кГц) на длинах волн 430–460 нм в лазере на $Al_2O_3:Ti^{3+}$ с внутрирезонаторным удвоением частоты на кристалле BiB_3O_6 (BBO), который накачивался излучением второй гармоники неодимового лазера с модуляцией добротности.

Дальнейший прорыв в развитии лазерных проекционных систем произошел в конце 20-го – начале 21-го века. Это было связано с разработками новых достаточно мощных источников лазерного излучения, генерирующих в зеленой, синей и красной областях спектра. Все эти источники разработаны на основе нелинейного преобразования длины волны ИК излучения твердотельных или

полупроводниковых лазеров в видимый диапазон длин волн. Наиболее эффективно это происходит в импульсном режиме работы лазеров с применением нелинейно-оптических монокристаллов или кристаллов с регулярной доменной структурой [23–27].

В 1998 г. немецкая компания Laser-Display-Technology (LDT) предложила новую технологию создания лазерных проекционных систем отображения телевизионной информации [28–30], которая вскоре нашла воплощение в серийно производимых установках немецкой фирмы JENOPTIK Laser.

Лазерный источник света в данной установке (рис.2) построен по схеме задающий генератор–усилитель–нелинейно-оптический преобразователь. Задающий генератор представляет собой лазер на кристалле YVO_4:Nd со светодиодной накачкой, работающий в режиме синхронизации мод на длине волны $\lambda = 1064$ нм и генерирующий импульсы излучения длительностью 7 пс с частотой следования 80 МГц и средней мощностью 4.5 Вт.

Это излучение проходит через четыре каскада лазерных усилителей на активных элементах из кристаллов YVO_4:Nd, и его мощность увеличивается до 42 Вт. Далее оно поступает в нелинейно-оптическую систему преобразования излучения, состоящую из удвоителей и сумматоров частоты на кристаллах LiB_3O_5 (LBO) и $KTiOAsO_4$ (KTA), а также оптического параметрического преобразователя на кристалле KTA. В результате этого преобразования на выходе формируются три лазерных пучка с длинами волн 532 нм ($P_G = 6.5$ Вт), 628 нм ($P_R = 7$ Вт), 462 нм ($P_B = 4.8$ Вт). Каждый из этих пучков модулируется по амплитуде с помощью ЭОМа или АОМа. Все пучки вводятся в одно многомодовое оптическое волокно, где их мощности складываются, и далее подводятся к зеркальной системе отклонения по строкам и кадрам, представляющей собой многогранный (25 граней) зеркальный вращающийся барабан и электромагнитный гальванометр кадровой развертки. С помощью оптического телескопического объектива на проекционном экране формируется телевизионное изображение. Суммарная выходная мощность модулированного лазерного излучения в данной системе равна ~10 Вт. Из-за очень малых длительностей лазерных импульсов (больших напряженностей электрического поля световых волн) эффективность преобразования по мощности ИК излучения в видимый свет составила 40%. Кроме того, из-за широкого частотного спектра пикосекундных световых импульсов в изображении отсутствует спекловая структура, которая обычно портит изображение в лазерных проекторах. Предельное число разрешимых элементов в изображении для рассматриваемой системы определяется отношением частоты следования световых импульсов к частоте кадровой развертки. При частоте смены кадров 25 Гц, за вычетом времени обратного хода развертки, эта величина примерно равна 3×10^6. Излучающий торец волокна является общим для всех длин волн, поэтому в системе отсутствует необходимость в совмещении цветов на экране.

К недостаткам системы можно отнести те, которые присущи механической высокоскоростной зеркальной системе разверток, используемой ранее в схеме с непрерывными газоразрядными лазерами [2], а также сложность конструкции системы, обусловленную необходимостью поддержания стабильных температурных режимов для резонаторов лазерной системы и нелинейных оптических преобразователей.

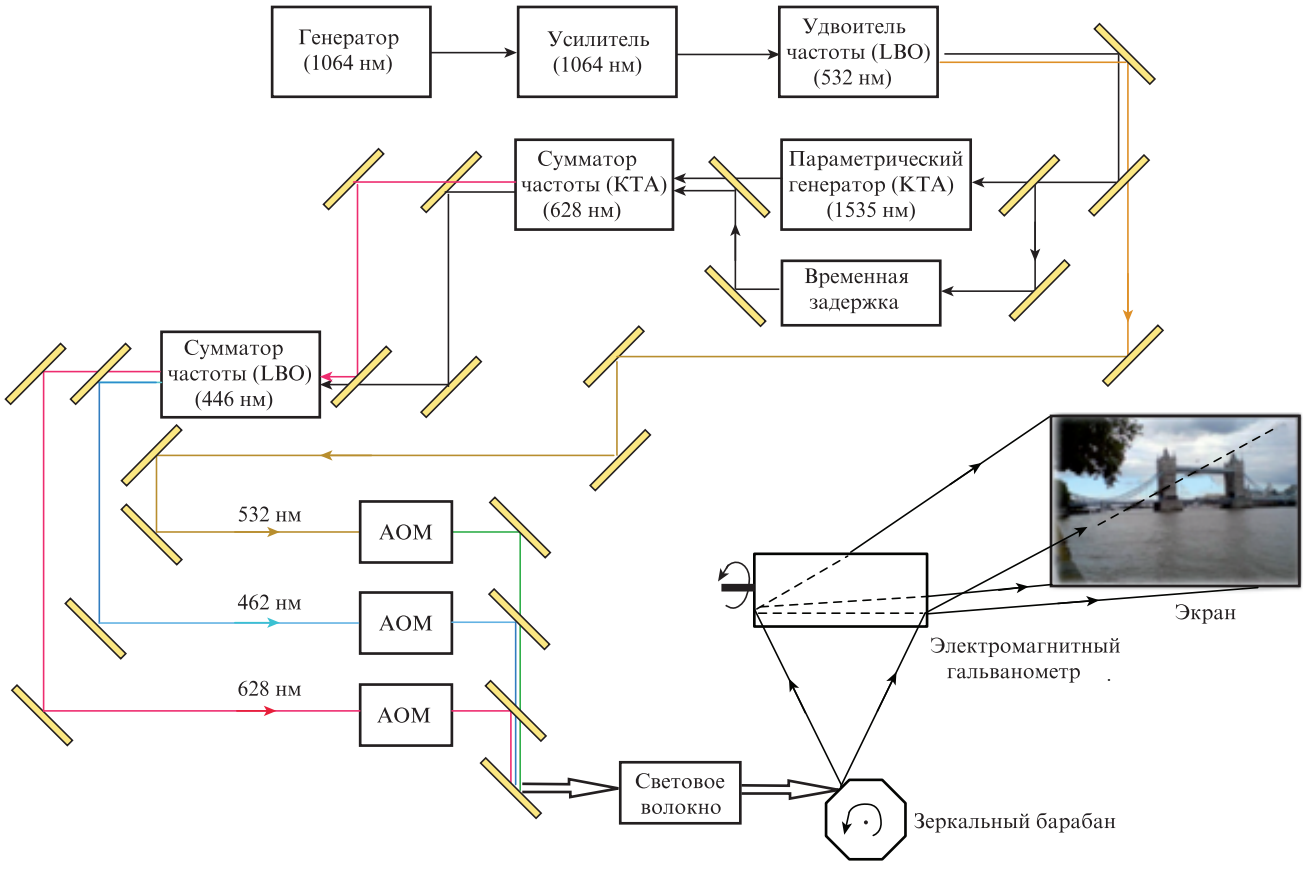


Рис.2. Функциональная схема лазерного проектора компании LDT.

Для рассмотренной проекционной системы ведутся работы по увеличению выходной мощности RGB лазеров и упрощению их конструкции. В [31, 32] представлены результаты разработки мощного RGB лазерного источника на основе тонкого диска из кристалла YAG:Yb, работающего в режиме пассивной синхронизации мод на длине волны $\lambda = 1030$ нм и генерирующего импульсы излучения длительностью 705 фс с частотой следования 57 МГц и средней мощностью 80 Вт. В данной установке удалось существенно увеличить мощность выходного излучения и упростить конструкцию за счет полного отказа от лазерных усилителей и упрощения схемы нелинейного преобразования. Так, например, в системе используются кристаллы с регулярной доменной структурой ($LiTaO_3$), работающие при комнатной температуре. За счет очень больших напряженностей светового поля удалось полностью отказаться от резонаторов с синхронной накачкой при параметрических преобразованиях. Средние выходные мощности разработанного лазерного RGB источника на длинах волн $\lambda_G = 515$ нм, $\lambda_B = 450$ нм и $\lambda_R = 603$ нм составили соответственно 23, 10.1 и 8 Вт. Коэффициент преобразования ИК излучения в видимый диапазон длин волн в данной системе составляет 51%. Сейчас эта система – наиболее мощный полноцветный источник лазерного излучения.

Другой перспективной технологией создания лазерных телевизионных проекторов в настоящее время является технология, основанная на использовании RGB лазеров компании Novalux [33, 34]. Это полупроводниковые лазеры с выводом излучения через боковую поверхность и с внешним резонатором (Novalux Extanded-Cavity Surface-Emitting Lasers (NECSEL)) (рис.3). В резонатор лазеров встроен нелинейный элемент с регулярной доменной структурой на основе $MgO:LiNbO_3$, позволяющий проводить эффективное внутрирезонаторное удвоение частоты основного излучения.

Компании удалось разработать RGB лазеры, излучающие в квазинепрерывном режиме ($f_{rep} = 500$ кГц, $\tau_0 = 200$ нс) на длинах волн $\lambda_G = 532$ нм, $\lambda_B = 465$ нм и $\lambda_R = 620–635$ нм. Средняя мощность излучения одного лазера составляет 50–120 мВт при полном КПД 5%–10%.

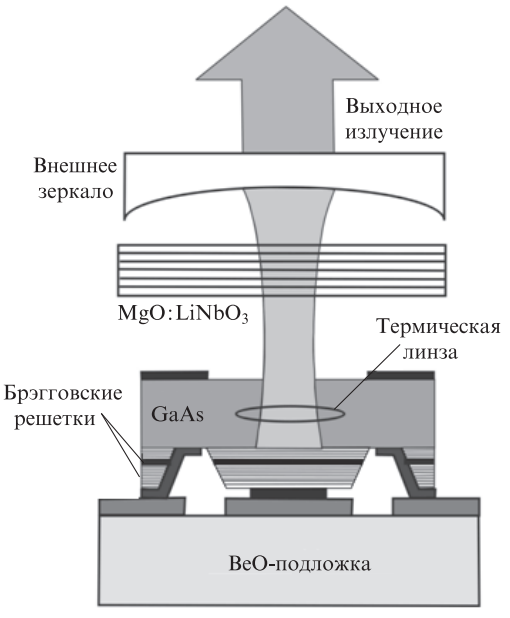


Рис.3. Оптическая схема лазера NECSEL.

Лазеры легко объединяются в линейки. Суммарная выходная мощность линеек из 14 отдельных лазеров может доходить до 1.5 Вт. Использование линеек, состоящих из большого числа независимых лазерных излучателей, позволяет существенно уменьшить контраст наблюдаемых спекловых структур в изображении.

В январе 2008 г. на выставке Consumer Electronics Show компания Mitsubishi Digital Electronics America официально представила первый в мире серийный лазерный телевизор с обратной проекцией (rear projection), в котором применяются лазеры компании Novalux. В качестве модуляторов света в нем была использована матрица кремниевых микрозеркал DMD (digital micromirror device) компании Arasor (Австралия), которая базируется на разработках корпорации Texas Instrument, создавшей новый тип формирователя изображения – цифровое микрозеркальное устройство DMD. Матрица состоит из 1920 × 1080 кремниевых зеркал размером 4 × 4 мкм. Каждое зеркало управляется электрическим напряжением и имеет два устойчивых положения, поэтому мощность отраженного от зеркал света регулируется временем приложения напряжения. В отличие от модуляторов на жидких кристаллах, которые также могут быть использованы в данном проекционном телевизоре, матрица микрозеркал, по мнению разработчиков, дает существенно более высокий контраст в изображении.

По нашему мнению, рассмотренная система формирования телевизионного изображения не лишена недостатков. Время переключения микрозеркал из одного положения в другое составляет десятки микросекунд, поэтому динамический контраст изображения должен быть не очень большим. Возможен эффект залипания зеркал. При больших мощностях светового излучения будут возникать проблемы с отводом тепла от кристаллической матрицы. Наблюдаемый эффект изменения интенсивности света в изображении основан на физиологии человеческого зрения и носит накопительный характер, что ограничивает возможность применения этих проекторов в других приложениях, например в быстродействующих устройствах отображения и записи информации, работающих в реальном масштабе времени.

Наиболее перспективным модулятором для проекционных систем отображения телевизионной информации с лазерами средней мощности, как импульсными, так и непрерывными, в настоящее время является линейный микромеханический модулятор, состоящий из электрически управляемой решетки микрозеркал, напыленных на подвижные микроподложки из нитрида кремния SiN. Данная технология изготовления модуляторов называется GLV (grating light valve), она впервые была предложена в 1992 г. [35] и получила дальнейшее развитие в работах [36, 37]. Модулятор может содержать 4096 независимо управляемых пикселей. Каждый пиксель состоит из двух элементов размером 3.7 × 200 мкм, один из которых управляемый и может перемещаться под действием электрического потенциала в пределах четверти длины волны падающего света, а другой – неподвижный. При подаче напряжения на управляемый элемент он смещается в сторону подложки и происходит отклонение света в направлении проекционной оптики. Управление интенсивностью отраженного света осуществляется временем нахождения световых лучей в отклоненном состоянии. В отличие от матрицы микрозеркал время переключения одного дифракционного элемента в GLV-модуляторе составляет все-

го 20 нс. Модулятор позволяет получить одномерную амплитудно-модулированную строку, состоящую из 4096 элементов. Развертку строк по кадру предполагается осуществлять с помощью электромагнитного гальванометра. Как утверждают разработчики GLV-модулятора, при частоте строчной развертки 60 Гц можно получить телевизионный растр, число строк в котором равно 8192. В настоящее время данную технологию изготовления модуляторов предполагается использовать с целью создания малогабаритных лазерных проекторов для вывода телевизионной информации с мобильных телефонов.

Сейчас нельзя говорить о том, что найден универсальный метод и разработана технология создания устройств отображения и записи информации, удовлетворяющие решению большинства практических задач. В результате развития науки и технологии старые технические решения могут быть востребованы на новом уровне. Одним из таких решений, на наш взгляд, может являться импульсный метод формирования телевизионного изображения с использованием АОМа.

К достоинствам данного метода формирования изображения следует отнести:

1) возможность использования для создания изображений только твердотельных акустооптических модуляторов и дефлекторов;

2) отсутствие системы высокоскоростной механической развертки по строке;

3) высокую линейность формируемого изображения по длине строки, связанную с постоянством скорости звука в кристалле АОМа;

4) простоту управления и ввода информации в систему;

5) высокое быстродействие системы;

6) возможность управления лазерными пучками большой мощности;

7) малую чувствительность к внешним вибрациям;

8) простоту оптической системы формирования изображения;

9) возможность быстрой перестройки размеров формируемого изображения и его расстояния от установки без потери числа разрешимых элементов;

10) отсутствие дискретности в изображении, обусловленное матричными модуляторами.

3. АОМ для импульсной системы формирования телевизионного изображения

Акустооптический пространственный модулятор света для импульсной системы формирования изображения строки должен отвечать ряду требований. Во-первых, длина звукопровода модулятора должна удовлетворять соотношению (1). Это требование ограничивает выбор материала звукопровода, с одной стороны, небольшой скоростью распространения ультразвука, а с другой стороны, условием, чтобы затухание ультразвуковых волн на длине L в выбранном частотном диапазоне не было большим. Во-вторых, модулятор должен достаточно эффективно управлять световым пучком, что предполагает выбор материала звукопровода с высоким коэффициентом акустооптического качества M_2 [38], а также иметь малые потери света на поглощение на рабочей длине волны. Для уменьшения потерь света на отражение необходимо иметь возможность нанесения на оптические окна модулятора интерференционных просветляющих покрытий, выдерживающих лазерное излучение большой интенсивности. В-третьих, материал звукопровода АОМа не должен обладать существенными фазовыми неоднородностями, приводящими к искажению волнового фронта световой волны, несущей информацию.

Анализ существующих в настоящее время сред для акустооптического взаимодействия показывает, что в наибольшей степени перечисленным требованиям в области частот ультразвука до 100–150 МГц удовлетворяет кристалл парателлурита (TeO_2). Этот прозрачный в видимом и ближнем ИК диапазонах длин волн одноосный кристалл имеет целый ряд уникальных акустооптических свойств [39, 40]. Так, например, скорость медленной сдвиговой ультразвуковой волны вдоль кристаллографического направления [110] составляет 0.616×10^3 м/с, что позволяет на отрезке длиной 32 мм вдоль этого направления разместить модулированный ультразвуковой сигнал длительностью 52 мкс.

Использование медленной сдвиговой ультразвуковой волны для дифракции света на звуке возможно при анизотропной геометрии акустооптического взаимодействия. При анизотропной геометрии рассеяния, в отличие от изотропной, волновые векторы падающей и дифрагированной световых волн лежат на разных поверхностях волновых векторов кристалла. Дифракция света происходит с поворотом плоскости поляризации. Оптическая активность кристалла TeO_2 приводит к тому, что при распространении света вблизи оптической оси нормальными типами волн являются волны с эллиптической поляризацией. В результате анизотропного рассеяния дифрагированные световые волны имеют зависящие от частоты ультразвука эллиптичность и азимут эллипса поляризации, а также противоположное по отношению к недифрагированной световой волне направление вращения вектора поляризации. Для эффективного использования световой мощности при акустооптическом взаимодействии в данном кристалле необходимо согласовывать поляризацию падающего на кристалл света с поляризацией, требуемой для выбранной геометрии рассеяния.

Геометрия акустооптического взаимодействия в реальном устройстве с импульсным методом формирования строки для АОМа из TeO_2, представлена на рис.4. В этом случае вдоль направления [110] кристалла TeO_2, совпадающего с осью x оптической системы, распространяется медленная ультразвуковая волна, вектор поляризации которой направлен по оси $[\bar{1}10]$ и совпадает с осью y. На модулятор падает параллельный плоскости дифракции $(\bar{1}10)$ световой пучок. Угол между волновым векто-

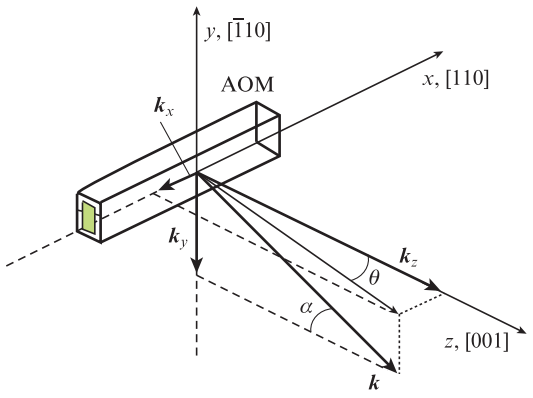


Рис.4. Геометрия акустооптического взаимодействия в кристалле TeO_2.

ром света $\boldsymbol{k}$ и его проекцией на плоскость $(\bar{1}10)$ равен α, а угол между проекцией этого вектора на плоскость $(\bar{1}10)$ и осью z равен θ. Дополнительный малый угол α вводится для того, чтобы учесть влияние входной фокусирующей линзы на эффективность акустооптической дифракции.

Кристалл TeO_2 отличается высокой степенью анизотропии упругих и оптических свойств. Расчеты показывают, что для плоскости рассеяния, совпадающей с плоскостью $(\bar{1}10)$ кристалла TeO_2, для анизотропной дифракции света на медленной сдвиговой волне, распространяющейся в направлении [110], и для малых углов между волновыми векторами света и оптической осью коэффициент акустооптического качества M_2 превышает соответствующее значение для плавленного кварца в 793 раза (для длины волны 632.8 нм). Такая большая эффективность позволяет использовать для управления акустооптическими устройствами небольшие мощности ультразвука (1 Вт и менее). С другой стороны, высокая анизотропия упругих свойств кристалла TeO_2 обуславливает необходимость строгой ориентации граней звукопровода. Так, разориентация грани, на которой размещен пъезопреобразователь, возбуждающий медленную сдвиговую волну, на 0.5° относительно оси [110] в плоскости (001) кристалла TeO_2 вызывает отклонение потока энергии упругой волны в готовом устройстве на 25° в указанной плоскости, являющейся плоскостью оптической апертуры АОМа. Последнее приводит к тому, что при малых отношениях высоты пъезопреобразователя к длине звукопровода акустооптическое взаимодействие будет осуществляться только с частью светового потока, падающего на модулятор. К аналогичному эффекту может приводить и клиновидность промежуточных связующих слоев между звукопроводом и пъезопреобразователем.

Затухание медленной звуковой волны на длине звукопровода 35 мм при частоте 80 МГц составляет 6–6.5 дБ. Несмотря на то что коэффициент затухания для этого типа ультразвуковой волны достаточно велик (290 дБ·см$^{-1}$ × ГГц$^{-2}$), естественная гиротропия кристалла позволяет эффективно использовать широкополосную анизотропную геометрию рассеяния света на частотах, не превышающих 100 МГц.

Технология роста кристаллов TeO_2 высокого качества в настоящее время хорошо освоена в ряде лабораторий мира [41–43]. Длина выращиваемой були кристалла вдоль кристаллографического направления [110] может достигать 60–100 мм при ее диаметре свыше 75 мм. При способе получения монокристаллов парателлурита, изложенном в работе [42], отсутствует соляризация, что позволяет изготавливать звукопроводы с очень низким уровнем рассеяния света. Рассеянияе, связанное с обработкой поверхности оптических окон или с паразитными отражениями внутри кристалла, может быть сведено к минимуму. Достигнутое качество просветляющих покрытий позволяет получить коэффициент пропускания АОМа из TeO_2 для видимого диапазона длин волн, равный 99.5%.

Исследования оптической стойкости кристаллов TeO_2 показывают, что кристаллы выдерживают периодический режим работы с частотой следования импульсов 1–3 Гц при интенсивностях лазерного излучения до 1 МВт/см^2 [44]. Совершенствование технологии изготовления и конструкции модуляторов из TeO_2 [45] позволило добиться их высокой стойкости к внешним воздействиям в виде механических вибраций, ударов по корпусу, ускорений и т.д. При правильной эксплуатации срок службы АОМа исчисляется годами.

Конструктивно АОМ содержит звукопровод из кристалла парателлурита, у которого две грани полированы и просветлены для длин волн лазерного излучения. К торцу кристаллической ячейки методом термокомпрессионной сварки прикреплен пьезопреобразователь из ниобата лития X-среза, возбуждающий сдвиговые упругие колебания в полосе выбранных частот акустооптического взаимодействия. На пъезопреобразователь напылены электроды из алюминия. Верхний электрод пьезоэлектрического преобразователя имеет форму вытянутого шестиугольника для подавления боковых акустических лепестков. Ячейка помещена в держатель, в котором также расположены устройство, согласующее выход генератора с пьезопреобразователем, и коаксиальный разъем для подвода электрического сигнала.

На рис.5 показана акустооптическая ячейка для проекционного телевизора [46] со звукопроводом из TeO_2 с приваренным пьезопреобразователем и напыленными электродами.

Разработанная авторами патента [18] акустооптическая ячейка была применена для формирования телевизионного изображения [46, 47]. Ячейка работает при дифракции в плоскости $(\bar{1}10)$, обеспечивая высокую эффективность дифракции, и позволяет, благодаря низкой скорости звука (616 м/с), ввести в модулятор всю телевизионную строку. Несущая частота ультразвука выбиралась равной 80 МГц, что позволяло при частотах модуляции до 20 МГц работать в режиме отсутствия двухфононного рассеяния света, которое на длине волны 510.6 нм происходит при частоте 57.9 МГц. Длительность телевизионной строки равна 64 мкс, часть этой строки длительностью 52 мкс содержит информацию об изображении, поэтому длина АОМа должна составлять ~32 мм.

Необычно большая расходимости акустического пучка, о чем говорится в работе [48], связана с неточностью изготовления исследуемых образцов и технологии изготовления АОМов в направлении оси [110] для медленной сдвиговой волны. Расходимость возникает при неточном изготовлении акустооптической ячейки. Отклонение от кристаллографического направления торца модулятора на одну угловую минуту приводит к отклонению потока энергии почти на один градус. Авторам [18] удалось пре-

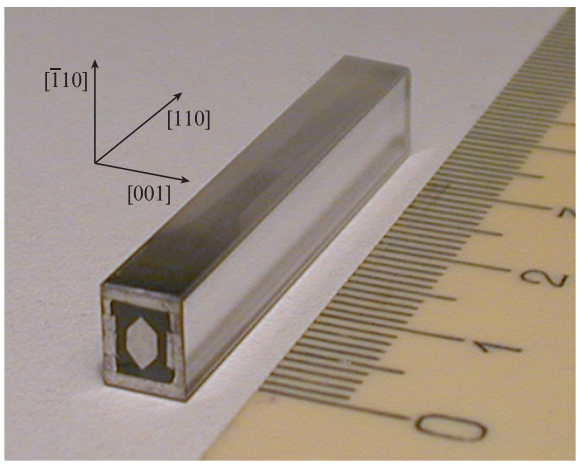


Рис.5. Фотография звукопровода АОМа из кристалла TeO_2 с приваренным пьезопреобразователем и напыленными электродами.

одолеть технологические трудности и обеспечить высокую точность ориентации плоскости (110), к которой термокомпрессией крепился пьезопреобразователь. Были изготовлены модуляторы, позволяющие размещать на длине звукопровода сигнал длительностью более 80 мкс, при этом на частотах порядка 100 МГц не наблюдалось существенной расходимости акустического пучка, что соответствовало поршневой зоне акустического излучателя при соответствующей его апертуре.

В АОМе из TeO_2 распространяющаяся вдоль направления [110] медленная сдвиговая упругая волна испытывает сильное затухание. С целью выравнивания амплитуды ультразвуковой волны по длине модулятора в блок управления системой по строке необходимо вводить компенсатор затухания, который служит для выработки напряжения, изменяющего коэффициент усиления одного из каскадов усилителя мощности так, чтобы амплитуда звуковых колебаний оставалась постоянной по длине АОМа.

4. Особенности формирования изображения в акустооптической системе с импульсным когерентным источником света

Задача о дифракции света на ультразвуке рассматривалась многими авторами [49–55]. В настоящее время существуют два наиболее общих подхода к ее решению, позволяющие, в принципе, получить решение с наперед заданной степенью точности. Первый подход основан на решении системы связанных дифференциально-разностных уравнений, описывающих взаимодействие между различными дифракционными порядками. Он нашел наиболее завершенное выражение в работах [56–64]. Другой подход основан на решении интегрального уравнения для поля, полученного с помощью введения эквивалентных токов и разложения искомого поля по плоским волнам [65–68], что позволяет получить аналитическое выражение для дифрагированного поля в виде сравнительно быстросходящихся рядов. Практический интерес, который вызывает кристалл TeO_2, требует изучения вопроса о дифракции света на ультразвуке в анизотропной среде с гиротропными свойствами. Обычно при рассмотрении дифракции света в таком кристалле авторы ограничиваются исследованием брэгговского режима.

В работах [69–71] приведено обобщенное решение дифракционной задачи в случае анизотропной среды, обладающей гиротропией, на основе метода, предложенного в работах [65–68], что в конечном счете позволяет получить выражение для дифрагированного поля после АОМа из TeO_2 при амплитудной модуляции сигнала по гармоническому закону в промежуточном режиме дифракции. На рис.6 представлена оптическая схема, которая была взята за основу при теоретическом рассмотрении процесса формирования телевизионного изображения в акустооптической системе с импульсным лазером [69–71], состоящая из АОМа, входной цилиндрической линзы Л1 и объектива из линз Л2 и Л3. Плоскости $x'z'$ и $y'z'$ системы выбраны таким образом, что в одной из них (плоскость $x'z'$) происходит дифракция света в АОМе и формирование изображения строки на экране Э, а в другой – отклонение строки в плоскости экрана. В фокальной плоскости объектива Л2 расположена диафрагма Д, которая отсекает нулевой порядок дифракции, оставляя только дифрагированные световые пучки в +1-м дифракционном порядке.

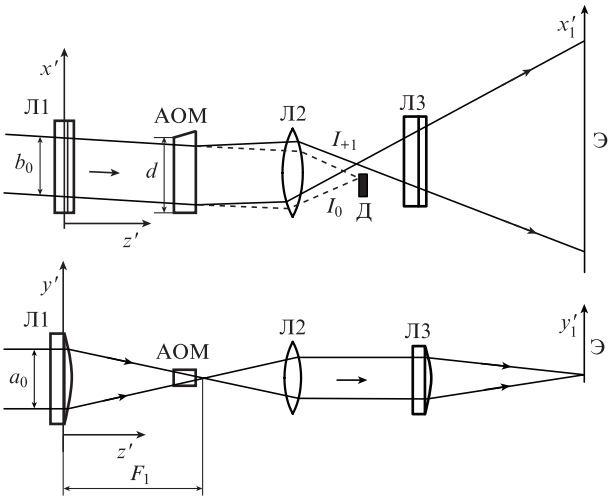


Рис.6. Оптические схемы системы формирования изображения строки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:
Л1 – входная цилиндрическая линза; Л2, Л3 – линзы объектива; Э – экран; Д – диафрагма; I_0, I_{+1} – интенсивности световых пучков в нулевом и первом дифракционных порядках; a_0, b_0 – размеры светового пучка по двум координатам; F_1 – фокусное расстояние линзы Л1; d – размер АОМа по оси x'.

Расчеты проводились для геометрии взаимодействия, имеющей место в реальном устройстве (рис.4) и соответствующей случаю широкополосной анизотропной дифракции света на медленной сдвиговой упругой волне, распространяющейся вдоль направления [110] кристалла TeO_2. В работах [69–71] выполнен расчет среднего по времени двумерного распределения интенсивности светового поля в плоскости изображения. Были проведены расчеты частотно-контрастной характеристики акустооптической системы формирования изображения строки с помощью импульсного лазера на парах меди и АОМа из TeO_2 для различных длительностей светового импульса, несущих частот ультразвука, длин акустооптического взаимодействия, а также углов падения света на АОМ в плоскости, ортогональной плоскости дифракции. Это позволяет учесть влияние входной цилиндрической линзы на эффективность акустооптической дифракции.

Предполагалось, что на вход АОМа подается амплитудно-модулированный ультразвуковой сигнал, аплитуда которого изменяется по закону

$$A(\boldsymbol{r}) = A_0\left[1 + m_0\cos\left(2\pi f_0\frac{\boldsymbol{r}}{\boldsymbol{v}}\right)\right] = A_0[1 + m_0\cos(\Phi_0 x)], \quad (4)$$

где m_0 – глубина модуляции; f_0 – частота модуляции; $\boldsymbol{v}$ – вектор скорости; $\boldsymbol{r}$ задает направление распространения ультразвукового возмущения в среде.

В предположении, что для центральной спектральной составляющей амплитудно-модулированного сигнала выполняются условия точного соответствия брэгговским условиям дифракции, а также с учетом только взаимодействия между +1-м и нулевым дифракционными порядками, были рассчитаны поле в +1-м дифракционном порядке на границе ультразвукового столба в АОМе из TeO_2 и средняя по времени интенсивность света в строке на экране. Расчет поля проводился согласно диаграмме рассеяния, представляющей собой последовательные акты диф-

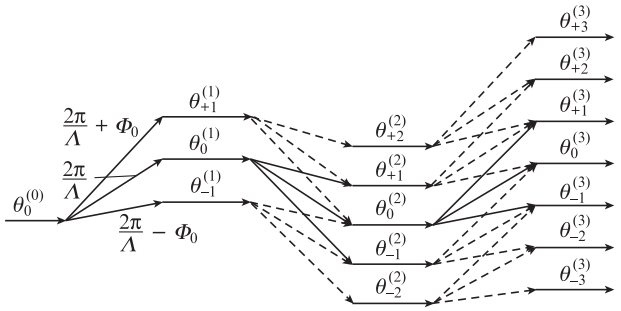


Рис.7. Диаграмма рассеяния при дифракции света в +1-й порядок в приближении третьего порядка взаимодействия; Λ – длина волны звука.

ракции света на спектральных составляющих ультразвуковой волны, при этом отклонение от брэгговских условий учитывалось за счет учета расходимости звукового пучка. В приближении третьего порядка взаимодействия такая диаграмма рассеяния представлена на рис.7. Окончательные расчеты проводились с точностью до пятого порядка взаимодействия включительно.

Горизонтальные стрелки на диаграмме соответствуют парциальным плоским волнам, распространяющимся под углами $\theta_p^{(m)}$, для порядков взаимодействия $m = 0, 1, 2, 3$. Наклонные стрелки обозначают возможные направления рассеяния этих волн под действием ультразвукового возмущения. Из диаграммы следует, что в приближении третьего порядка взаимодействия для сигнала с тремя спектральными составляющими имеются 27 возможных геометрий рассеяния, дающих вклад в дифрагированное поле вблизи +1-го порядка. Спектр этого поля состоит из семи составляющих с различными углами дифракции $\theta_p^{(3)}$ и частотами, различающимися на величину $\Delta\Omega_p = p2\pi f_0$, где $p = -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. При расчетах учитывалась эллиптичность каждой спектральной составляющей дифрагированных световых волн.

В приближении третьего порядка взаимодействия среднее по времени распределение интенсивности света в строке на экране по координате x_1' для гауссовой формы светового импульса имеет вид

$$I_1(x_1') = \tilde{I}_0\chi_0^2\left\{C_0 + 2\sum_{n=1}^{6}\left[C_{n1}\cos\left(\frac{2\pi n f_0 x_1'}{v}\right) + C_{n2}\sin\left(\frac{2\pi n f_0 x_1'}{v}\right)\right]\exp\left[-\left(\frac{\pi n f_0 \tau_0}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right]\right\}, \quad (5)$$

$$\tilde{I}_0 = \frac{c\tau_0 a_0^2 E_0^2}{16\lambda_0\sqrt{\pi\ln 2}\, M_1' M_2' TF_1}, \quad (6)$$

где T – период следования световых импульсов; τ_0 – длительность светового импульса по уровню интенсивности 0.5; E_0 – напряженность электрического поля световой волны в воздухе; M_1' и M_2' – коэффициенты увеличения оптической системы по строке и по кадру; λ_0 – длина волны света в вакууме; χ_0 – индекс модуляции. Коэффициенты C_0, C_{n1}, C_{n2} зависят от углов $\theta_p^{(m)}$, m_0, эллиптичности парциальных световых волн и индекса модуляции

$$\chi_0 = \frac{\pi A_0 \xi^{(0)} n_o^3 L(p_{11} - p_{12})}{2\lambda_0}, \quad (7)$$

где $\xi^{(0)}$ – нормированная деформация среды; n_o – показатель преломления для обыкновенной световой волны; L – длина акустооптического взаимодействия; p_{11}, p_{12} – фотоупругие постоянные TeO_2.

Первое слагаемое в выражении (5) определяет постоянную составляющую в сигнале изображения. Помимо слагаемых с сомножителями C_{11} и C_{12}, описывающих модуляцию с основной частотой f_0, в сигнале изображения будут присутствовать слагаемые с более высокими гармониками, вплоть до 6-й гармоники входного сигнала, приводящие к его искажению.

Особенностью работы АОМа при формировании телевизионного изображения является существенная нелинейность его амплитудной передаточной характеристики, приводящая к уменьшению рабочего динамического диапазона системы и искажению светового сигнала при больших эффективностях дифракции.

На рис.8 представлены характерные зависимости эффективности дифракции в максимумах сигнала изображения $I(\chi_0) = I_{+1}^{\max}/(I_{+1}^{\max} + I_0^{\max})$ для входного амплитудно-модулированного по гармоническому закону ультразвукового сигнала (4) от индекса модуляции χ_0 при различных частотах модуляции f_0 и длинах L акустооптического взаимодействия. На рис.9 показаны экспериментальные зависимости относительной интенсивности света в максимуме сигнала изображения от амплитуды U_s входного гармонического сигнала с несущей частотой $f = 82.5$ МГц при различных частотах модуляции ультразвука. Сравнение приведенных на этих рисунках зависимостей при

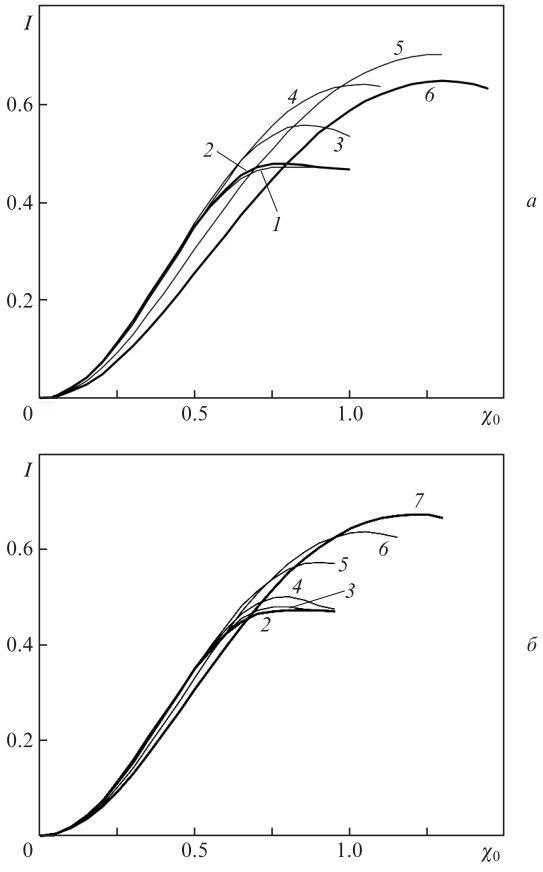


Рис.8. Зависимости эффективности дифракции в максимумах сигнала изображения $I(\chi_0)$ при $L = 6$ (*а*) и 2 мм (*б*), $\lambda_0 = 510.6$ нм, $f = 80$ МГц, $\tau_0 = 10$ нс для частот модуляции $f_0 = 0.5$ (*1*), 1 (*2*), 3 (*3*), 5 (*4*), 10 (*5*), 15 (*6*) и 20 МГц (*7*).

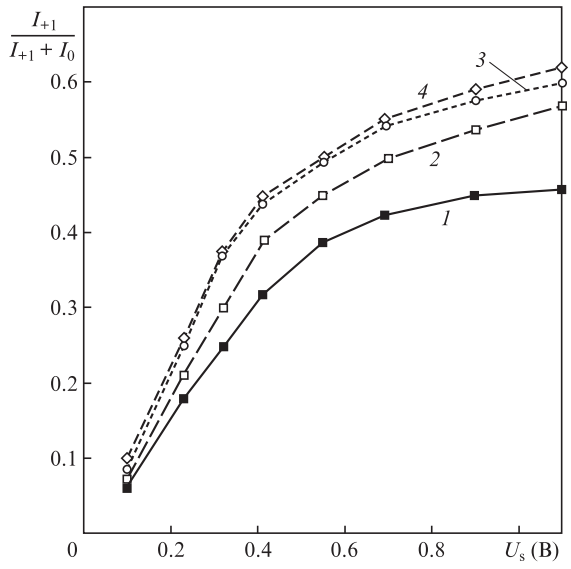


Рис.9. Экспериментальные зависимости относительной интенсивности света в максимуме сигнала изображения от амплитуды U_s входного гармонического сигнала с несущей частотой f = 82.5 МГц при частотах модуляции ультразвука f_0 = 1 (*1*), 3 (*2*), 5 (*3*) и 10 МГц (*4*).

больших амплитудах сигнала указывает на их качественное совпадение.

Теоретическое и экспериментальное рассмотрение процесса формирования изображения в акустооптической системе с импульсным источником когерентного света показывает, что при больших амплитудах ультразвукового сигнала в формируемом изображении возникают искажения, обусловленные повторной дифракцией света в более высокие дифракционные порядки модулирующего сигнала и приводящие к уширению энергетического спектра сигнала изображения. С ростом амплитуды спектр сигнала изображения изменяется. В нем появляются дополнительные составляющие, связанные с нелинейностью процесса дифракции света на ультразвуке. При возрастании амплитуды ультразвукового сигнала в этих составляющих сосредотачивается все бóльшая доля световой энергии. Кроме того, нарушается симметрия спектра относительно центральной составляющей. Степень искажения изображения при больших индексах модуляции зависит от частоты модуляции, длительности светового импульса и длины акустооптического взаимодействия. При центральной настройке (брэгговские условия взаимодействия выполнены для центральной спектральной составляющей амплитудно-модулированного сигнала) для малых частот модуляции боковые спектральные составляющие расположены близко к несущей частоте ультразвука. Для них легче выполняются условия для возникновения повторной дифракции и, следовательно, для появления боковых спектральных составляющих на частотах, кратных частоте модуляции. При этом форма гармонического сигнала изображения искажается, приближаясь к прямоугольной. На рис.10 представлено рассчитанное изменение формы гармонического сигнала в изображении $I_s(x) = I_1(x)/\tilde{I}_0$ с ростом индекса модуляции при частоте модуляции 1 МГц. При увеличении индекса модуляции рост интенсивности в максимуме резко уменьшается, т. к. энергия светового поля эффективно перекачивается в дифракционные составляющие на частотах, кратных частоте модуляции.

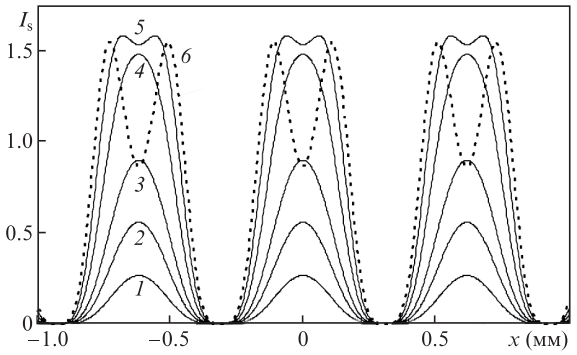


Рис.10. Изменения формы гармонического сигнала в изображении на частоте модуляции f_0 = 1 МГц при индексе модуляции χ_0 = 0.2 (*1*), 0.3 (*2*), 0.4 (*3*), 0.6 (*4*), 0.8 (*5*) и 1.0 (*6*).

Для более высоких частот f_0 спектральные составляющие в дифрагированном световом поле, соответствующие повторной дифракции, из-за ограничения полосы акустооптического взаимодействия имеют существенно меньшую амплитуду, чем для низких частот. В них при дифракции перекачивается меньшая доля энергии светового поля. Форма сигнала искажается в меньшей степени и наблюдается рост интенсивности света в максимуме сигнала изображения при увеличении амплитуды ультразвукового сигнала. При высоких частотах f_0 уменьшение $I(\chi_0)$ связано с конечностью полосы акустооптического взаимодействия, при этом перекачка энергии в боковые спектральные составляющие уменьшается, что приводит к уменьшению контраста в изображении и в конечном счете к полной потере информации о модуляции ультразвукового сигнала. В этом случае изображение на экране представляет собой равномерную световую засветку с интенсивностью, соответствующей амплитуде центральной спектральной составляющей сигнала.

Рассмотренное явление наблюдается в эксперименте. Оно является нежелательным и приводит к ограничению допустимой эффективности дифракци света на низких модулирующих частотах. Для увеличения коэффициента использования световой мощности лазерного источника необходимо вводить в тракт усиления видеосигнала амплитудные корректоры, обеспечивающие выравнивание нелинейностей амплитудных характеристик АОМа для разных частот. Передаточная характеристика корректора должна иметь вид $U_2 = F^{-1}(U_1)$, где $F^{-1}(x)$ – функция, обратная $F(x)$. Обеспечить точную коррекцию в широкой полосе частот модуляции для АОМа сложно. Можно, например, разбить тракт прохождения видеосигнала в корректоре на несколько параллельных частотных каналов, которые перекрывают весь частотный спектр входного сигнала, каждый со своим законом коррекции нелинейности передаточной характеристики. Далее эти сигналы суммируются, причем должны быть выравнены фазовые задержки при прохождении сигналов по каждому каналу. При такой коррекции мощность лазерного излучения будет использоваться более эффективно.

Следует отметить, что при формировании изображения вдоль строки особых требований к когерентности и спектральной чистоте лазерного излучения не предъявляется, т.к. строится картина изображения ультразвукового поля в АОМе. Единственным требованием является возможность убирать нулевой и паразитные порядки дифракции с помощью диафрагмы Д. В то же время в направ-

лении кадровой развертки на экране должно формироваться изображение перетяжки светового пучка, поэтому к пространственной когерентности лазерного излучения по этой координате предъявляются высокие требования. Реальное число разрешимых элементов в кадре будет зависеть от фактической ширины диаграммы направленности лазерного излучения и от факторов, приводящих к ее уширению после прохождения света через оптическую формирующую систему. Этими факторами, кроме больших углов падения света на АОМ в плоскости, ортогональной плоскости дифракции, могут быть неоднородности показателей преломления оптических элементов системы, приводящие к искажению фронта световой волны, а также неоднородность распределения светового поля на выходной апертуре дефлектора, вызванная, например, неравномерным освещением апертуры падающим светом либо неодинаковой дифракционной эффективностью вследствие затухания упругой волны.

На рис.11 представлены результаты расчетов зависимости эффективности дифракции в максимумах сигнала изображения $I(\chi_0) = I_{+1}^{\max}/(I_{+1}^{\max} + I_0^{\max})$ от частоты модулирующего сигнала f_0 при различных индексах модуляции χ_0 и длинах акустооптического взаимодействия L. Величина $I_{+1}^{\max}$ рассчитывалась в приближении пятого порядка взаимодействия, а $I_0^{\max}$ – в приближении четвертого порядка. Приведенные зависимости можно рассматривать как амплитудно-частотные характеристики акустооптической системы формирования изображения с импульсным лазером и АОМом из TeO_2.

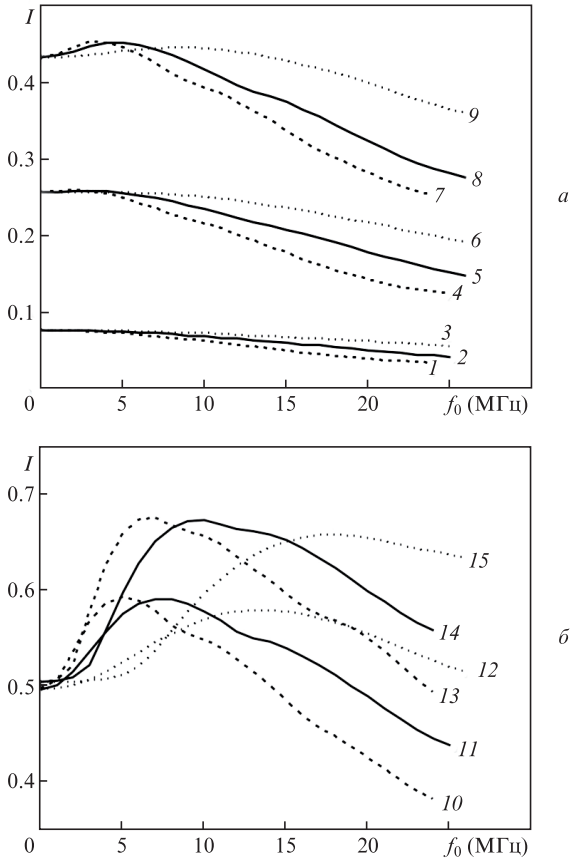


Рис.11. Зависимости эффективности дифракции в максимумах сигнала изображения $I(\chi_0)$ в приближении пятого порядка взаимодействия от частоты модулирующего сигнала f_0 при L = 6, 4 и 2 мм для χ_0 = 0.2 (*1*, *2*, *3*), 0.4 (*4*, *5*, *6*) и 0.6 (*7*, *8*, *9*) (*а*), а также при L = 6, 4 и 2 мм для χ_0 = 0,8 (*10*, *11*, *12*) и 1.0 (*13*, *14*, *15*) (*б*).

Из рис.11 видно, что уменьшение длины L приводит к увеличению эффективности дифракции в высокочастотной области и уширению полосы частот акустооптического взаимодействия. Увеличение же L, с одной стороны, увеличивает эффективность дифракции в области низких частот, а с другой – уменьшает диапазон рабочих частот системы. При больших индексах модуляции эффективности дифракции на низких частотах (0.1–1 МГц) выравниваются, что связано с ограничением амплитуды в результате перекачки световой энергии в высокие гармоники модулирующего сигнала. Эта эффективность ограничивается уровнем ~0.5 на частотах модуляции до 1 МГц.

На рис.12 представлены зависимости эффективности дифракции в максимумах сигнала изображения $I(\chi_0)$, рассчитанные для пятого порядка взаимодействия при различных частотах модулирующего сигнала f_0 и длительностях светового импульса τ_0 для L = 4 мм. Эти зависимости отображают амплитудные передаточные характеристики системы. Видно, что для формирования изображения амплитудно-модулированного ультразвукового сигнала с полосой частот 5 – 7 МГц (стандартный телевизионный сигнал) вполне достаточно использовать лазеры с длительностью светового импульса $\tau_0 \simeq 30 - 40$ нс.

Уширении полосы частот видеосигнала при больших длительностях светового импульса приводит к тому, что эффективность дифракции на высоких частотах резко падает. Одновременно снижается контраст этих спектральных составляющих. Увеличение интенсивности светового изображения происходит только за счет увеличения мощности несущей частоты сигнала.

При модуляции несущей частоты ультразвука входным сигналом со сложным спектром рассмотрение нелинейных искажений в сигнале изображения при больших амплитудах ультразвука существенно усложняется. Световые поля в результате дифракции на звуке в первом порядке будут содержать частотные составляющие, сдвинутые по частоте в соответствии со спектром модулирующего сигнала. В результате повторной дифракции для каждой частотной составляющей появляются кратные частоты в соответствии с порядком акустооптического взаимодействия, амплитуды которых нелинейно зависят от индекса модуляции. Далее в плоскости изображения все поля складываются и образуют картину распределения интенсивности, в которой за счет перемножения полей возникают дополнительные гармоники для основных частот спектра, а также комбинационные составляющие. Возрастание интенсивности света в комбинационных спектральных составляющих более высокого порядка, чем первый, будет определяться процессами повторной дифракции и происходить одновременно с перекачкой энергии в спектральные составляющие с кратными гармониками модулирующих частот входного сигнала. Поэтому полученные в результате расчетов для одной модулирующей частоты значения индексов модуляции χ_0, начиная с которых нелинейные искажения в сигнале изображения резко возрастают, будут теми же и при сигнале со сложным спектром. Для получения небольших искажений в сигнале изображения необходимо, по-видимому, чтобы индексы модуляции для всех спектральных составляющих входного модулирующего сигнала не превышали допустимую величину χ_0 для своей частоты.

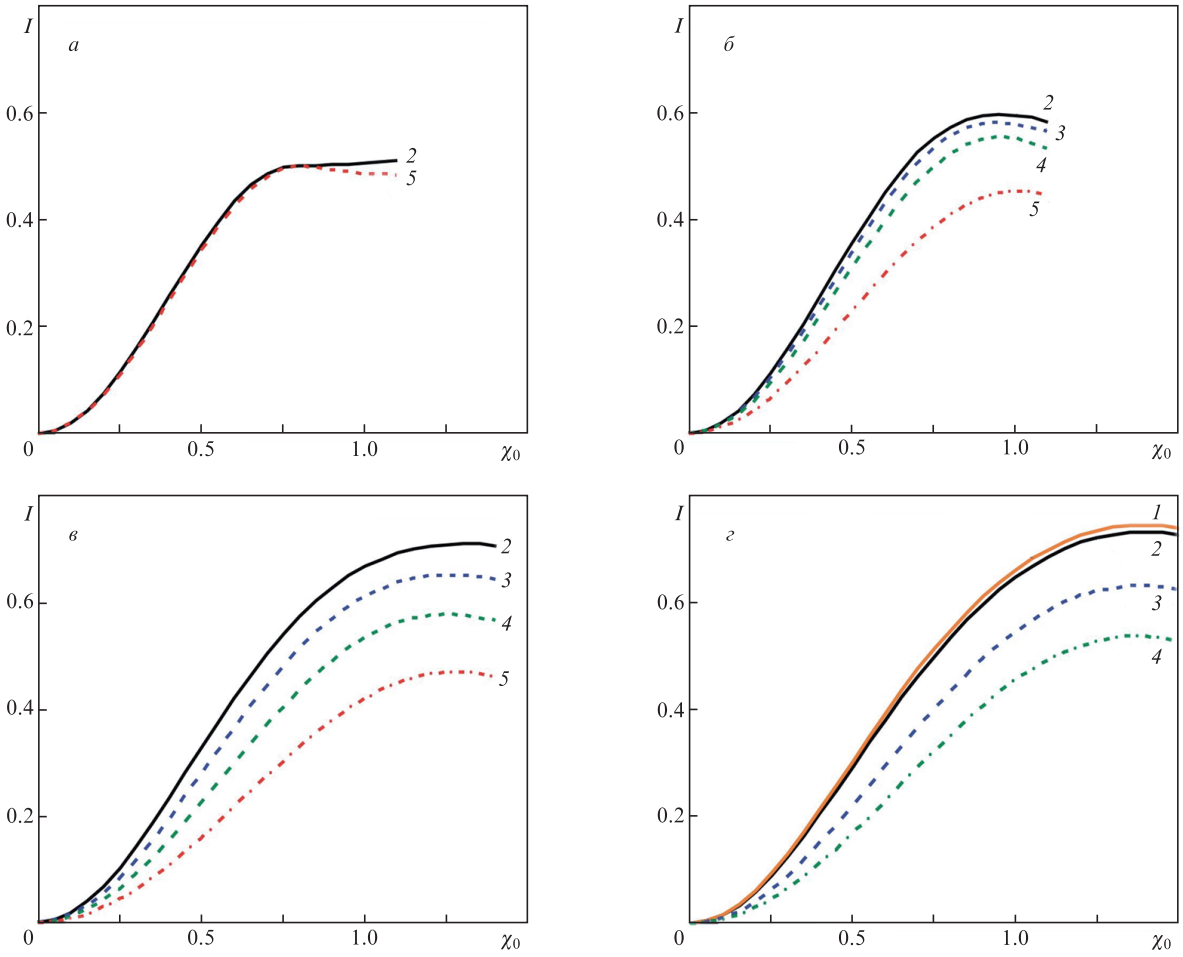


Рис.12. Зависимости эффективности дифракции в максимумах сигнала изображения $I(\chi_0)$ в приближении пятого порядка взаимодействия при длительностях светового импульса τ_0 = 5 (*1*), 10 (*2*), 30 (*3*), 50 (*4*) и 100 нс (*5*) и частотах модуляции f_0 = 1 (*а*), 5 (*б*), 10 (*в*) и 15 МГц (*г*).

5. Устройства кадровой развертки светового пучка

Выбор устройства отклонения светового пучка по кадру зависит от требований, предъявляемых ко всей системе отображения информации. К характеристикам, определяющим работу такого устройства, можно отнести число разрешимых элементов, линейность отклонения, эффективность, возможность совмещения изображений на разных длинах волн. Число разрешимых элементов на выходе из любого дефлектора при сканировании определяется выражением

$$N_{\rm fr} = \Delta\varphi_{\rm sc}/\Delta\Psi_0, \qquad (8)$$

где $\Delta\varphi_{\rm sc}$ – угол сканирования; $\Delta\Psi_0$ – расходимость светового пучка на выходе из дефлектора.

Для электромеханических дефлекторов (зеркальные гальванометры, вращающиеся многогранные зеркальные барабаны) углы сканирования могут достигать нескольких десятков градусов. При расходимости светового пучка, близкой к дифракционной, число разрешимых элементов в кадре может доходить до нескольких тысяч. Если требуемое разрешение не столь велико, как, например, в телевизионном стандарте с 625 строками в кадре, можно использовать световые пучки с расходимостью, существенно превышающей дифракционный предел. При применении зеркальных электромагнитных гальванометров помимо обеспечения высоких линейности и стабильности прямого хода развертки необходимо обеспечить быстрый возврат зеркала в исходное состояние за время гасящего кадрового импульса (1.6 мс и менее). В настоящее время имеется большой выбор электромагнитных гальванометров с приемлемыми для отклонения лазерного пучка характеристиками (фирмы Cambridge Technology Inc., General Scanning Inc., GSI Lumonics).

Применение АОДов для отклонения светового пучка по кадру удобно из-за отсутствия механически перемещающихся деталей и узлов, чувствительных к механическим вибрациям и перепадам давления, а также из-за возможности быстрого электронного управления параметрами развертки. Большим преимуществом АОДов по сравнению с электромагнитными гальванометрами является существенно меньшее время обратного хода светового пучка. Для АОДа это время определяется временем пробега звуковой волны по звукопроводу и равняется всего нескольким десяткам микросекунд. Угол сканирования АОДа не превышает нескольких градусов, поэтому при работе с таким дефлектором необходимо стремиться к минимальной расходимости лазерного пучка и учитывать все механизмы, приводящие к уширению диаграммы направленности лазерного излучения по координате y. При расчетах оптической системы необходимо также учитывать толщину звукопровода АОДа.

Для фиксированного угла $\Delta\varphi_{\rm sc}$ максимальное число разрешимых элементов на выходе из АОДа получается

при дифракционной расходимости падающего на дефлектор лазерного излучения и однородном распределении дифрагированного поля на прямоугольной выходной апертуре:

$$N_{\rm fr} = D\Delta\varphi_{\rm sc}/\lambda_0, \qquad (9)$$

где D – размер апертуры дефлектора в плоскости рассеяния. В случае если распределение поля в выходном пучке дефлектора неоднородно, в частности вследствие уменьшения эффективности дифракции за счет затухания упругой волны, то, как показано, например, в [72], предельное разрешение уменьшается.

Угол сканирования можно определить путем решения системы уравнений, выражающей закон сохранения энергии и импульса для взаимодействующих световых и звуковых волн в кристалле [73]. Для геометрической интерпретации этого решения удобно воспользоваться векторными диаграммами рассеяния. Каждая векторная диаграмма соответствует предельному случаю дифракционной теории, для которого выполняется условие Брэгга для падающей и дифрагированной световых волн:

$$\boldsymbol{k}_{\rm d} = \boldsymbol{k}_{\rm i} + \boldsymbol{k}_{\rm snd}, \qquad (10)$$

где $\boldsymbol{k}_{\rm i}$, $\boldsymbol{k}_{\rm d}$ и $\boldsymbol{k}_{\rm snd}$ – волновые векторы световых и звуковой волн.

Из векторной диаграммы рассеяния вытекают соотношения между модулями волновых векторов падающего, $\boldsymbol{k}_{\rm i} = (2\pi/\lambda_0)n_{\rm i}$, и дифрагированного, $\boldsymbol{k}_{\rm d} = (2\pi/\lambda_0)n_{\rm d}$, света в кристалле, углами падения $\theta_{\rm i}$ и дифракции $\theta_{\rm d}$, а также волновым вектором упругой волны $\boldsymbol{k}_{\rm snd} = (2\pi f/v)\boldsymbol{r}$, где вектор $\boldsymbol{r}$ задает направление ее распространения. Изменение одной из величин, входящих в векторный треугольник, влечет за собой изменение других.

Для АОДа обычно используется такой режим работы, при котором направление и величина волнового вектора падающего света $\boldsymbol{k}_{\rm i}$ остаются постоянными, а изменение направления дифрагированного светового пучка достигается путем изменения частоты и направления распространения ультразвуковой волны. Требуемое изменение направления распространения ультразвуковой волны наиболее просто осуществить на низких частотах за счет дифракционной расходимости звукового пучка. Обычно для отклонения света по кадру на АОД подается ультразвуковой сигнал, частота которого изменяется по линейному закону.

Исследованию особенностей геометрии акустооптического взаимодействия в кристаллах различных классов посвящено много работ, в частности [74, 75]. Во всех этих работах отмечается, что дефлекторы, использующие анизотропную дифракцию света, имеют определенное преимущество перед дефлекторами с изотропной дифракцией. Это преимущество выражается в том, что при работе вблизи частоты

$$f_{\rm d} = \frac{v}{\lambda_0}\sqrt{|n_{\rm e}^2 - n_{\rm o}^2|}$$

необходимый диапазон углов отклонения может быть достигнут при меньшей расходимости ультразвуковой волны, а следовательно, и при меньших энергозатратах. Из анизотропных дефлекторов многие авторы [76, 77] выделяют дефлектор на кристалле TeO_2, в котором может быть осуществлена широкополосная геометрия рассеяния на довольно низких частотах ультразвука в полосе 50–100 МГц при высокой эффективности дифракции (70%–80%). Как правило, диапазон используемых звуковых частот не превышает одной октавы, чтобы устранить попадание в область сканирования второго дифракционного порядка.

Предельное число разрешимых элементов в этом дефлекторе можно определить из соотношения

$$N_{\rm fr} = \Delta f D/v. \qquad (11)$$

Для дефлектора с параметрами $D = 15$ мм, $\Delta f = 50$ МГц и $v = 0.65 \times 10^3$ м/с получаем по критерию Рэлея $N_{\rm fr} \simeq 1154$, что вполне приемлемо для систем отображения информации, работающих в стандарте повышенной четкости.

Для эффективной работы АОДа параметры светового пучка должны отвечать определенным требованиям. Так, в плоскости отклонения по кадру пучок света, падающий на дефлектор, должен быть параллельным и иметь размеры, соответствующие размерам звукового пучка в кристалле АОДа, а поляризация падающего света должна соответствовать требуемой для выбранной геометрии акустооптического взаимодействия. Большое значение при конструировании АОДа имеет однородность и ширина звукового пучка в пределах рабочей апертуры дефлектора. Для неискаженного воспроизведения изображения на экране дефлектор должен одинаково эффективно отклонять световые пучки, относящиеся к дифракционным составляющим, из которых формируется это изображение. Рабочая апертура АОДа, определяемая шириной звукового столба в дефлекторе, является фильтром пространственных частот и задает полосу пропускания системы формирования телевизионного изображения.

6. Оптимизация параметров излучения импульсных лазеров применительно к проекционной системе отображения информции

Теоретическое рассмотрение процесса формирования изображения строки в акустооптической системе с импульсным лазером показывает, что на качество воспроизводимой информации существенное влияние должны оказывать такие параметры лазерного излучения, как его расходимость и длительность импульса генерации. Большая длительность импульса генерации должна приводить к снижению предельного числа разрешимых элементов и уменьшению контраста в изображении амплитудно-модулированных сигналов. Расходимость лазерного излучения должна соответствовать возможностям используемого в системе дефлектора светового излучения. В случае применения в системе АОДа она должна быть близка к дифракционной. Кроме того, для эффективного использования световой мощности, поляризация падающего на АОМ лазерного излучения должна соответствовать собственной моде световой волны, распространяющейся в среде взаимодействия АОМа.

Основные требования, которые должны учитываться при выборе лазеров для импульсной системы формирования телевизионного изображения, таковы:

1) работа лазера в импульсном режиме с частотой следования импульсов, равной частоте телевизионных строк;

2) малая длительность импульсов лазерного излучения в соответствии с выражением (2);

3) достаточно высокая средняя мощность лазерного излучения;

4) поляризация излучения должна быть согласована с собственной модой световой волны в АОМе;

5) возможность создания полноцветного лазерного RGB источника света.

Разработка лазера, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям, является первоочередной задачей, которую необходимо решить при создании устройства отображения информации, принцип работы которого основан на импульсном методе формирования строки.

7. Импульсные лазеры для системы формирования телевизионного изображения

7.1. Газовые лазеры

Исторически первыми лазерами, наиболее подходящими для импульсного метода формирования телевизионного изображения, были лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов [78], которые до сих пор остаются одними из самых мощных источников когерентного излучения в видимом диапазоне длин волн [79–81]. К настоящему времени получена генерация и созданы лазеры на переходах атомов различных металлов, причем многие из генерируемых линий лежат в видимом диапазоне длин волн.

Наилучшие энергетические характеристики имеет лазер на парах меди, в котором генерация происходит на двух длинах волн: $\lambda_1 = 510.6$ нм и $\lambda_2 = 578.2$ нм. Характерная длительность импульсов генерации равна 5–30 нс, а частоты их следования составляет 8–30 кГц, что соответствует частотам следования телевизионных строк. Средняя мощность генерации этого лазера при использовании системы задающий генератор – усилитель может достигать сотен ватт при КПД 1%. Красный цвет для телевизионной системы отображения информации может быть получен с использованием лазера на парах золота (λ = 627.8 нм). Несмотря на то что была получена генерация на парах висмута ($\lambda = 472.2$ нм) [82] и железа ($\lambda = 452.9$ нм) [83], вопрос о создании достаточно эффективного импульсного лазера на самоограниченных переходах на синей линии с выходными характеристиками, близкими к характеристикам лазеров на парах меди и золота, остается открытым.

Большое усиление и малая длительность существования инверсии в активной среде приводят к трудностям при создании лазеров с высокой направленностью излучения, что необходимо, например, для их применения в проекционных системах отображения телевизионной информации. Уменьшение расходимости излучения вплоть до дифракционной может быть достигнуто при использовании в лазере неустойчивого резонатора с большим коэффициентом увеличения [84]. При этом уменьшение расходимости на порядок по сравнению с расходимостью излучения лазера с устойчивым резонатором приводит к уменьшению выходной мощности примерно на 30%. Большую выходную мощность при высокой направленности выходного излучения можно получить в системе задающий генератор – усилитель лазерного излучения [85].

К сожалению, выбор достаточно мощных лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов для систем отображения информации в видимом диапазоне длин волн в настоящее время ограничен практически только лазерами на парах меди и золота. Остальные лазеры имеют низкую эффективность.

7.2. Твердотельные лазеры

В последнее время (конец 20-го – начало 21-го века) происходит интенсивное развитие твердотельных импульсных лазеров и лазерных систем с нелинейным преобразованием ИК излучения в видимый диапазон длин волн. Твердотельные лазеры с оптической накачкой лазерными диодами привлекают к себе внимание малыми размерами, большим сроком службы и высоким практическим КПД. Управляемый импульсный режим работы этих лазеров реализуется при внутрирезонаторной модуляции добротности с использованием электрооптических или акустооптических модуляторов добротности. Наиболее простым способом получения импульсного излучения в видимом диапазоне длин волн при этом является внутрирезонаторное преобразование частоты во вторую или в третью гармонику. Так, в работе [86] было получено внутрирезонаторное преобразование во вторую гармонику излучения Nd:YVO_4-лазера на $\lambda = 1342$ нм. Для преобразования использовался нелинейный кристалл BBO. Средняя выходная мощность излучения на λ = 671 нм составила 4.38 Вт при $f_{\text{rep}} = 70$ кГц, $\tau_0 = 290$ нс и КПД преобразования 9.5%.

Получено внутрирезонаторное преобразование во вторую гармонику излучения лазера с активным элементом на кристалле $GdVO_4$:Nd [87]. Для преобразования использовался нелинейный кристалл LBO. Средняя выходная мощность излучения на $\lambda = 671$ нм составила 6 Вт при f_{rep} = 47 кГц, τ_0 = 97 нс и КПД преобразования 12.8%. Коэффициент качества излучения $M^2 = 2.47$, а флуктуации выходной мощности были равны 5.8%.

В результате внутрирезонаторного суммирования основного излучения и второй гармоники получено выходное излучение на λ = 447 нм в Nd:$YAlO_3$ (Nd:YAP)-лазере с акустооптической модуляцией добротности [88]. Преобразование во вторую гармонику осуществлялось в кристалле LBO, а суммирование – в кристалле $KTiOPO_4$ (KTP). Средняя выходная мощность на λ = 447 нм составила 4.46 Вт при $f_{\text{rep}} = 4.6$ кГц и $\tau_0 = 190$ нс, а флуктуации мощности излучения были равны 3% в течение 1 ч.

Наибольшая средняя мощность 138 Вт выходного излучения второй гармоники (λ = 532 нм) Nd:YAG-лазера с диодной накачкой, работающего в режиме модуляции добротности с частотой следования импульсов 10 кГц и их длительностью 70 нс, была получена в [89]. В этой работе внутрирезонаторное преобразование во вторую гармонику осуществлялось с помощью нелинейного кристалла LBO. Эффективность преобразования излучения накачки лазерных диодов (λ = 808 нм) в лазерное излучение на λ = 532 нм составила 17.3% при общем КПД лазера 7.9%. Плотность мощности лазерного излучения в перетяжке равнялась 434 МВт/см^2 при коэффициенте качества пучка $M^2 = 11$, а флуктуации мощности излучения составили 3% в течение 200 ч. В работе [90] осуществлено улучшение выходных характеристик этого лазера: получена выходная мощность 120 Вт при $f_{\text{rep}} = 10$ кГц, $\tau_0 = 80$ нс и $M^2 = 6{,}2$.

Относительно большая длительность импульсов излучения данных лазеров определяется использованием в

них для модуляции добротности АОМа. Меньшую длительность генерации можно получить с помощью ЭОМа. Так, например, в работе [91] сообщается об исследовании макета твердотельного лазера на кристалле $YVO_4:Nd$ с диодной накачкой, работающего в режиме модуляции добротности с частотой следования импульсов f_{rep} = 20 кГц и с внутрирезонаторным удвоением частоты в кристалле LBO. В данной работе удалось получить длительность выходных импульсов излучения τ_0 =10 нс благодаря применению в качестве модулятора добротности ЭОМа на кристалле $La_3Ga_5SiO_{14}$ (LGS). Средняя выходная мощность лазерного излучения P_{out} на λ = 532 нм составила 2.3 Вт при максимальном оптическом КПД преобразования 9.6%. Наилучшее качество излучения ($M^2 < 2$) было получено при P_{out} = 1.5 Вт, при этом флуктуации выходной мощности не превышали 1.4%.

Более сложными системами преобразования ИК излучения твердотельных лазеров являются системы с использованием нелинейного параметрического преобразования света. В работах [92, 93] источником основного излучения служил твердотельный лазер с диодной накачкой (λ = 805 нм) на кристалле флюорита лития-иттрия, допированного неодимом ($YLiF_4:Nd$). Лазер состоял из задающего генератора, работающего в режиме модуляции добротности, и двух каскадов усиления на том же кристалле. Для модуляции добротности использовался АОМ. Выходное излучение основного источника удваивалось по частоте в нелинейном кристалле LBO. Параметры полученного при этом излучения следующие: средняя выходная мощность P_{out} = 30 Вт на λ = 524 нм, частота следования f_{rep} = 22.5 кГц, длительность световых импульсов τ_0 = 35 нс, коэффициен качества светового пучка $M^2 < 1.2$. Это излучение преобразовывалось далее в нелинейной оптической системе, состоящей из оптического параметрического генератора и двух удвоителей частоты на кристаллах LBO. В результате на выходе такой системы формировалось лазерное излучение на трех длинах волн – 524 нм (P = 5.8 Вт), 628 нм (P = 6 Вт), 449 нм (P = 3.5 Вт), которое могло быть использовано для полноцветного телевизионного проектора со световым потоком 4000 лм. Вся лазерная система потребляла от розетки 365 Вт при полном КПД 11%.

По сравнению с газовыми лазерами на парах металлов твердотельные лазеры имеют малые размеры, высокий практический КПД и большой ресурс работы (до 10^4 ч). Тем не менее по отдельным характеристикам выходного излучения, весьма важным для проекционных систем отображения информации с импульсными лазерами, они им в настоящее время уступают. Это прежде всего высокий уровень флуктуаций выходной мощности лазерного излучения, а также недостаточно малая для мощных твердотельных лазеров, работающих в режиме модуляции добротности, длительность световых импульсов (~100 нс).

8. Особенности формирования телевизионных изображений в акустооптической системе с импульсным лазером

При конструировании оптической системы с импульсным методом проекции амплитудно-модулированной строки необходимо принимать во внимание следующие факторы.

АОМ в представленной на рис.6 оптической схеме размещен в фокальной плоскости цилиндрической линзы. Поэтому при использовании больших мощностей лазерного излучения плотность мощности в области перетяжки пучка достигает больших значений, что может приводить к локальному разогреву и нарушению оптической однородности материала звукопровода АОМа. Это, в свою очередь, вызывает ухудшение параметров проецируемой телевизионной строки, т.е. уменьшение числа разрешимых элементов и ограничение размеров и яркости проецируемого изображения. В пределе, при малой расходимости лазерного излучения, возможно разрушение звукопровода АОМа. Кроме того, размещение звукопровода АОМа в перетяжке лазерного пучка, совпадающей с предметной плоскостью проекционного объектива, приводит к тому, что проекционная система становится чрезвычайно чувствительной к различным неоднородностям показателей преломления материала звукопровода и окон модулятора, которые проявляются в виде вертикальных полос в изображении.

К другим особенностям рассматриваемой системы можно отнести одновременную генерацию в лазере излучений на нескольких длинах волн, которые можно использовать при формировании изображения. Например, лазер на парах меди излучает на двух длинах волн – λ_1 = 510.6 нм и λ_2 = 578.2 нм, средние мощности излучения на которых в стационарном режиме разогрева активного элемента примерно равны. В случае настройки АОМа из TeO_2 на максимальную эффективность дифракции излучения на одной из этих длин вол (λ_1) при выбранной частоте ультразвука f и угле падения θ'_{i1} условия для эффективной дифракции излучения на другой длине волны при этом угле падения не выполняются или выполняются для части полосы частот модулирующего сигнала. В результате при формировании изображения с помощью одного АОМа приходится использовать только одну длину волны излучения лазера на парах меди и тем самым существенно уменьшать эффективность использования света.

Отметим также, что в зависимости от условий накачки активного элемента момент достижения максимума мощности излучения спектральной компоненты с длиной волны λ_2 в лазере на парах меди запаздывает относительно момента появления максимума мощности излучения спектральной компоненты с λ_1 на время $\Delta\tau_0 \approx 10-20$ нс. За это время ультразвуковая волна в АОМе перемещается на расстоние $\Delta l = \Delta\tau_0 v$. В результате световые реплики сигнала телевизионной строки, появляющиеся на выходе АОМа, для компонент с разными длинами волн будут сдвинуты относительно друг друга.

Для устранения этих недостатков в оптической схеме проекционного устройства, представленной на рис.13, выходящий из лазера параллельный световой пучок с линейной поляризацией падает под углом 45° в горизонтальной плоскости на дихроичное зеркало 31, которое отражает спектральную компоненту пучка с длиной волны λ_1 и пропускает компоненту с λ_2.

Спектральная компонента излучения лазера с длиной волны λ_2 падает на зеркало 32 под углом $45°-\beta$ и после отражения проходит еще раз через зеркало 31. Таким образом, система зеркал 31 и 32 расщепляет первоначальный пучок света на две компоненты с длинами волн λ_1 и λ_2, распространяющиеся под углом 2β друг к другу. Далее оба пучка проходят через преобразователь поляризации

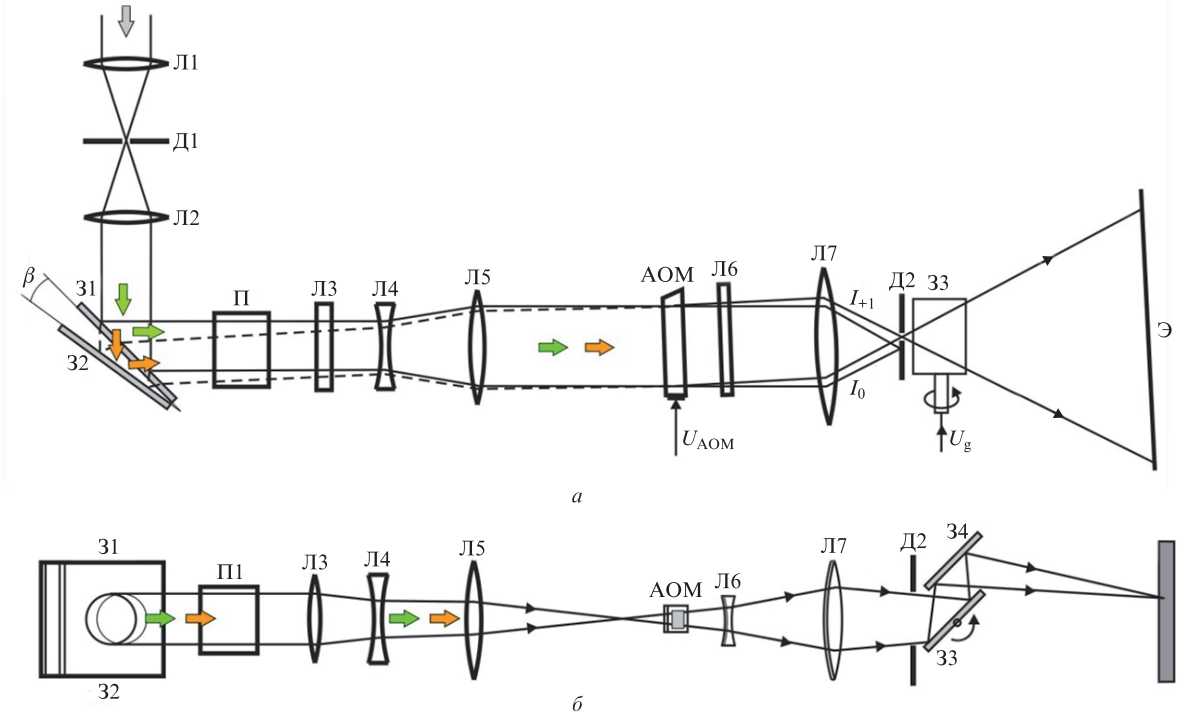


Рис.13. Оптические схемы проекционного устройства отображения телевизионной информации в двух взаимно ортогональных плоскостях ($U_{АОМ}$ и U_g – сигналы управления модулятором и гальванометром). Схема на рис.13,*а* соответствует горизонтальной плоскости, совпадающей с плоскостью дифракции АОМа.

лазерного излучения П (ромб Френеля), который изменяет их поляризации с линейных на эллиптические (близкие к циркулярным), так чтобы они были близки к собственным поляризациям падающих на звуковой пучок световых волн в кристалле АОМа из TeO_2.

Лазерное излучение, прошедшее через преобразователь поляризации П, поступает на преобразователь апертур лазерного пучка, состоящий из линз Л3, Л4, Л5, который изменяет размеры параллельных лазерных пучков двух спектральных компонент в горизонтальной плоскости до размеров рабочей апертуры АОМа и формирует сходящиеся пучки в вертикальной плоскости. После прохождения через преобразователь апертур угол между осями пучков двух спектральных компонент с длинами волн λ_1 и λ_2 становится равным $2\beta/M$, где M – коэффициент увеличения согласующего телескопа, состоящего из линз Л4, Л5. Оба пучка падают на звукопровод АОМа под углами θ_{i1} и θ_{i2} в горизонтальной плоскости и далее распространяются внутри звукопровода под углами θ'_{i1} и θ'_{i2}. Зеркала 31 и 32 расположены таким образом, чтобы лазерные пучки с длинами волн λ_1 и λ_2 оказались совмещенными друг с другом и с апертурой АОМа в плоскости дифракции. Для лазера на парах меди для одной выбранной несущей частоты ультразвука f можно рассчитать внешние углы падения $\theta_{i1} = n_o\theta'_{i1}$ и $\theta_{i2} = n_o\theta'_{i2}$ световых пучков с длинами волн λ_1 и λ_2 и угол $\beta = M(\theta_1 - \theta_2)/2$. При $f = 80$ МГц и $M = 1.6$ получаем $\theta_1 = 0.051$ рад, $\theta_2 = 0.049$ рад, $\beta = 1.6 \times 10^{-3}$ рад.

На выходе АОМа в первом порядке дифракции образуется спектр дифрагированных световых волн, соответствующий спектру амплитудно-модулированного звукового сигнала. Объектив Л7 отображает отвечающее этому спектру изображение в плоскость экрана Э. Все лишние дифракционные порядки фильтруются диафрагмой Д2. Поскольку источником дифракции световых волн является одна и та же звуковая волна, то ее визуализированные изображения на длинах волн λ_1 и λ_2 должны пространственно совпадать. Для этого оптическая система из линзы Л6 и объектива Л7 должна быть скорректирована на отсутствие хроматической аберрации.

Оптическая система на рис.13, в отличие от оптической системы на рис.6, построена таким образом, что предметная плоскость формируемого на экране изображения и плоскость фокусировки светового пучка после преобразователя апертур разнесены. Это обеспечивается тем, что предметная плоскость анаморфотного корректора, состоящего из отрицательной цилиндрической линзы Л6 и проекционного объектива Л7, совпадает с фокальной плоскостью преобразователя апертур, а предметная плоскость проекционного объектива – с выходной апертурой АОМа. В результате не происходит фокусировки светового пучка внутри кристалла АОМа. Это дает возможность работать с большими средними мощностями лазерного излучения.

В оптической схеме, представленной на рис.13, плоскость фокусировки преобразователя апертур расположена перед АОМом. Установка цилиндрической линзы Л6 после АОМа позволяет осуществить фокусировку строки на экране в вертикальной плоскости, при этом происходит усреднение светового поля на выходной апертуре модулятора по вертикали в плоскости изображения, что уменьшает влияние дефектов кристалла и неоднородностей звукового поля в модуляторе на качество изображения строки на экране.

Для развертки изображения по вертикали в оптической схеме на рис.13 используется электромагнитный зеркальный гальванометр 33.

Для устранения третьего недостатка, связанного с временны́м несовпадением импульсов излучения на разных длинах волн, после АОМа можно установить компенса-

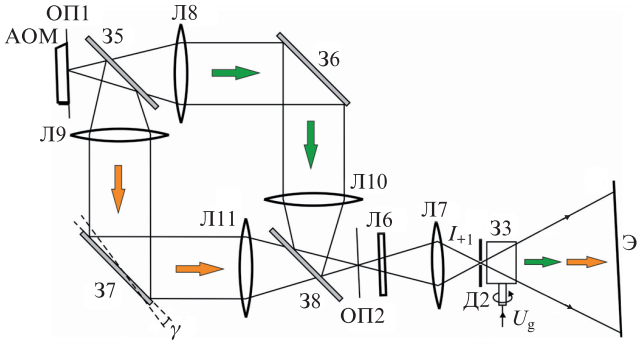


Рис.14. Оптическая схема компенсатора временно́го сдвига изображений на разных длинах волн.

тор временно́го сдвига изображений телевизионной строки для компонент излучения с длинами волн λ_1 и λ_2, осуществляющий совмещение световых реплик сигнала телевизионной строки для указанных компонент в предметной плоскости объектива Л7. На рис.14 представлена оптическая схема компенсатора, принцип действия которого основан на цветовом разделении изображений, переносе этих изображений с выходной апертуры АОМа (плоскость ОП1) по двум оптически одинаковым каналам и дальнейшем совмещении изображений в промежуточной плоскости ОП2, совпадающей с предметной плоскостью объектива Л7.

Для достижения этих целей выходная апертура АОМа (плоскость ОП1) располагается перед разделительным зеркалом З5 таким образом, что она совпадает с фокальной плоскостью линз Л8 и Л9. Лазерное излучение, дифрагированное в АОМе, падая на дихроичное зеркало З5, разделяется на две спектральные компоненты с длинами волн λ_1 и λ_2. Первая спектральная компонента проходит через зеркало З5, линзу Л8 и, отразившись от зеркала З6 и пройдя через линзу Л10, после отражения от зеркала З8 совмещается в предметной плоскости проекционного объектива Л7 со второй спектральной компонентой. Вторая спектральная компонента изображения проходит по своему оптическому пути, состоящему из таких же оптических элементов, как и оптический путь первой компоненты, и такой же длины. Поворотом зеркала З7 на небольшой угол γ можно совмещать изображения на длинах волн двух спектральных компонент в плоскости ОП2. Далее это совмещенное изображение переносится объективом Л7 на экран.

Еще одной особенностью оптической системы формирования телевизионного изображения с помощью АОМа (рис.13) является большая глубина резкости изображения амплитудно-модулированного сигнала, что может быть использовано при построении объемных изображений, для подавления спекловой структуры, при применении экранов с неровной поверхностью, а также позволяет располагать экран под малым углом к системе формирования изображения и тем самым уменьшать поперечные размеры телевизионной системы. Возникающие при этом трапецеидальные искажения растра и нелинейность развертки по кадру можно скомпенсировать электронными способами.

На рис.15 представлены фотографии телевизионного изображения, полученные с экрана лазерного телевизионного проектора при его работе в лабораторных условиях с использованием лазера на парах меди [47].



Рис.15. Фотографии телевизионного изображения, полученые с экрана лазерного телевизионного проектора.

9. Заключение

Рассмотренные в настоящем обзоре акустооптические лазерные системы формирования телевизионных изображений могут найти применение для управления излучением мощных импульсных лазеров видимого и ИК диапазонов длин волн. Существующая технология изготовления акустооптических модуляторов и дефлекторов позволяет разрабатывать и производить полностью твердотельные, легко управляемые и надежные устройства, работающие в реальном масштабе времени и выдерживающие большие мощности лазерного излучения. Описанные способы формирования изображений могут найти применение в специальных системах, требующих, например, отсутствия движущихся механических устройств отклонения лазерного пучка; в лазерных системах подводной локации для создания синхронной подсветки объектов; в технологических лазерных системах послойного формирования сложных объемных структур с высокой производительностью операций, а также могут использоваться в передвижных комплексах для информационного обеспечения при чрезвычайных ситуациях.

1. Korpel A., Adler R., Desmares P., et al. *Proc. IEEE*, **54**, 1429 (1966).
2. Ямамото М., Танеда Т. *Лазерные устройства отображения* (М.: Мир, 1979, т. 2).
3. Gordon E.I. *Proc. IEEE*, **54**, 1391 (1966).
4. Аксенов Е.Т., Бухарин Н.А., Игнатов А.Б. и др. *Труды ЛПИ*, **366**, 69 (1974).
5. Taneda T. et al. *J. SMPTE*, **82** (6), 470 (1973).
6. Gorod J., Knox J.D., Goedertier P.V. *RCA Rev.*, **33**, 623 (1972).
7. Geoffrey G.F. *Radio Electron. Eng.*, **39** (3), 123 (1970).
8. Бенедичук И.В., Обозненко Ю.Л., Смирнов Е.И. и др. *Техника кино и телевидения*, № 6, 3 (1978).
9. Watson W.N., Korpel A. *Appl. Opt.*, **9**, 1176 (1970).
10. Klima M. *Slaboproudýobzor*, **40**, 415 (1979).

11. Yamada Y., Yamamoto M., Nomura S. *Proc. Conf. 6th Int. Quantum Electron*. (Kyoto, 1970, p. 242).
12. Yamamoto M. *Hitachi Rev*., **24**, 89 (1975).
13. Nowicki T. *Electro-Opt. Syst. Design*, **6** (2), 23 (1974).
14. Yamamoto M. US Patent, № 3818129 (1974).
15. Okolicsanyi F. *Wireless Eng*., **14**, 527 (1937).
16. Бергман Л. *Ультразвук и его применение в науке и технике* (М.: ИЛ, 1957).
17. Lowry J.B., Welford W.T., Humphries M.R. *Opt. Lasers Technol*., **20**, 255 (1988).
18. Мокрушин Ю.М., Шакин О.В. Патент РФ № 2104617; *БИ*, № 28 (1998).
19. Mokrushin Yu.M., Shakin O.V. *J. Russ. Laser Res*., **17**, 381 (1996).
20. Martinsen R.J., Aylward R.P. *Photonics Spectra*, № 11, 109 (1996).
21. Martinsen R.J., Karakawa M., McDowell S.R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng*., **3000**, 150 (1996).
22. *Laser Focous World*, **35** (5), 13 (1999).
23. Armstrong J.A., Bloembergen N., Ducuing J., Pershan P.S. *Phys. Rev*., **127**, 1918 (1962).
24. Franken P.A., Ward H.F. *Rev. Mod. Phys*., **35**, 23 (1963).
25. Lim E.J., Fejer M.M., Byer R.L. *Electron. Lett*., **25** (3), 174 (1989).
26. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Физматлит, 2004).
27. Hu X.P. *Opt. Lett*., **33**, 408 (2008).
28. Wallenstein R. US Patent, № 5.828.424 (1998).
29. Nebel A., Ruffing B., Wallenstein R. *Proc. Laser and Electro-Optics Society Annual Meeting (LEOS IEEE)* (Orlando, Fl, 1998, pp 395–396).
30. Nebel A., Ruffing B., Wallenstein R. *Laser Focus World*, **35** (5), 263 (1999).
31. Brunner F., Innerhofer E., Marchese S.V., et al. *Opt. Lett*., **29**, 1921 (2004).
32. Innerhofer E., Brunner F., Marchese S.V., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **23** (2), 265 (2006).
33. Watson J.P. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng*., **5364**, 116 (2004).
34. Shchegrov A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5332**, 151 (2004).
35. Solgaard O., Sandejas F.S.A., Bloom D.M. *Opt. Lett*., **17**, 688 (1992).
36. Bloom D.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3013**, 165 (1997).
37. Trisnadi J.I., Carlisle C.B., Monteverde R. *Proc. Micromachining and Microfabrication Symp*. (San Jose, CA, 2004).
38. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. *Акустооптические устройства и их применение* (М.: Сов. радио, 1978).
39. *Акустические кристаллы. Справочник*. Под ред. М.П.Шаскольской (М.: Наука, 1982).
40. Uchida N., Ohmachi Y. *J. Appl. Phys*., **40**, 4692 (1969).
41. Турок И.И., Головей М.М. *Тез. докл. II Всесоюзн. конф. «Актуальные проблемы получения и применения сегнето и пьезоэлектрических материалов»* (М., 1984, с. 264).
42. Шакин О.В., Кудзин А.Ю., Горбенко В.М., Акимов С.В., Портретный В.П., Гришмановский А.Н. А.С. № 1529785 (СССР) (1989).
43. Колесников А.И., Каплунов И.А., Терентьев И.А. *Кристаллография*, **49**, 229 (2004).
44. Проклов В.В. *Радиотехника и электроника*, **25**, 1543 (1980).
45. Goutzoulis A., Pape D., Kulakov S. *Design and Fabrication of Acoustooptic Device* (New York: Marcel Dekker Inc., 1994).
46. GulyaevYu.V., Kazaryan M.A., Mokrushin Yu.M., Prokhorow A.M., Shakin O.V. *Laser Phys*., **12** (11), 1368 (2002).
47. Васильев Ю.П., Казарян М.А., Мокрушин Ю.М., Прохоров А.М., Шакин О.В. *Светотехника*, № 5, 7 (1998).
48. Балакший В.И., Манцевич С.Н. *Акустический журн*., **58**, 600 (2012).
49. Brillouin L. *Act. Sci. Ind*., **59**, 1 (1933).
50. Raman C.V., Nath N.S.N. *Proc. Ind. Acad. Sci*., **2A**, 406, 413 (1935); **3A**, 75, 119, 459 (1936).
51. Рытов С.М. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **2**, 223 (1937).
52. Quate C.F., Wilkinson C.D.W., Winslow D.K. *Proc. IEEE*, **53**, 1604 (1965).
53. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1970).
54. Сорока В.В. *Акустический журн*., **19**, 877 (1973).
55. Маркузе Д. *Оптические волноводы* (М.: Мир, 1974).
56. Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Радиотехника и электроника*, **18**, 703 (1973).
57. Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Радиотехника и электроника*, **19**, 1178 (1974).
58. Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Квантовая электроника*, **2**, 318 (1975).
59. Мартынов А.М. *Радиотехника и электроника*, **22**, 533 (1977).
60. Сташкевич А.А. *Оптика и спектроскопия*, **45**, 967 (1978).
61. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. *Физические основы акустооптики* (М.: Радио и связь, 1985).
62. Кулак Г.В. *ЖТФ*, **67**, 80 (1997).
63. Кулак Г.В., Николаенко Т.В. *ЖПС*, **73**, 819 (2006).
64. Михайловская А.С., Михайловская Л.В. *Оптика и спектроскопия*, **110**, 317 (2011).
65. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **26**, 1570 (1983).
66. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А., Ветров К.В. В сб.: *Обработка радиосигналов акустоэлектронными и акустооптическими устройствами* (Л.: Наука, 1983, с. 51).
67. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А., Липовский А.А. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **26**, 1021 (1983).
68. Петрунькин В.Ю., Водоватов И.А. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **27**, 332 (1984).
69. Мокрушин Ю.М. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, № 2, 93 (2011).
70. Мокрушин Ю.М. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, № 3, 99 (2011).
71. Мокрушин Ю.М. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, № 4, 118 (2011).
72. Молоток В.В., Разживин Б.П. *Акустооптические методы и техника обработки информации. Межвузовский сборник* (Л.: ЛЭТИ, 1980, вып. 142, с. 10).
73. Дамон Р., Мэлони В., Мак-Магон Д. *Физическая акустика* (М.: Мир, 1974, т. 7).
74. Леманов В.В., Шакин О.В. *ФТТ*, **14**, 229 (1972).
75. Писаревский Ю.В., Сильвестрова И.М. *Кристаллография*, **19**, 1003 (1973).
76. Uchida N., Ohmachi P. *Jpn. J. Appl. Phys*., **9** (1), 155 (1970).
77. Богданов С.В., Большева Т.А. *Автометрия*, № 5, 34 (1985).
78. Петраш Г.Г. *УФН*, **105**, 645 (1971).
79. Little C.E. *Metal Vapour Laser: Physics, Engineering and Applicaitions* (Chichester: J. Wiley and Sons, 1999).
80. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Угольников С.А. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 192 (2001).
81. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. *Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения* (М.: Физматлит, 2005).
82. Маркова С.В., Петраш Г.Г., Черезов В.М. *Квантовая электроника*, **4**, 1154 (1977).
83. Linevsky M.J., Karrus T.W. *Appl. Phys. Lett*., **33**, 720 (1978).
84. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А. и др. *Квантовая электроника*, **1**, 863 (1974).
85. Беляев В.П., Зубов В.В., Комальдинов Н.А. и др. *Электронная промышленность*, **10**, вып. 138, 28 (1984).
86. Du C., Ruan S., Yu Y., Wang Z. *Opt. Express*, **13**, 8591 (2005).
87. Du C., Ruan S., Yu Y., Zeng F. *Opt. Express*, **13**, 2013 (2005).
88. Haiyong Z., Ge1 Z., Chenghui H., et al. *Opt. Express*, **16**, 2989 (2008).
89. Konno S., Kojima T., Fujikawa S., et al. *Opt. Lett.*, **25**, 105 (2000).
90. Bo Y., Geng A., Bi Y., et al. *Appl. Opt*., **45**, 2499 (2006).
91. Tang H., Xiaolei Z., Junqing M., et al. *Chin. Opt. Lett*., **7**, 812 (2009).
92. Lee D., Moulton P.F. *Proc. CLEO'2001* (Washington, OSA, 2001, paper CThJ2, p. 424).
93. Moulton P.F., Snell K.J., Lee D., et al. *Proc. IMAGE 2002 Conf.* (Scottsdale, Arizona, 2002).