

УСТРОЙСТВА И ЭЛЕМЕНТЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382.375

Д. В. ШЕЛОПУТ
(Новосибирск)

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ-РАСЩЕПИТЕЛИ

Применение лазеров для измерения скоростей в настоящее время выделилось в самостоятельную область — лазерную доплеровскую локацию. Начало развития этого направления положено в работе [1], где впервые показана возможность определения малых сдвигов частоты рассеянного излучения методом фотосмещения. В основе метода — определение доплеровского сдвига частоты в свете, рассеянном примесными частицами в потоке. Оптическое устройство направляет лазерное излучение в заданную точку движущейся среды. Выделение доплеровского сдвига в рассеянном световом пучке осуществляется методом оптического гетеродинамирования опорного и рассеянного пучков [2]. Для определения знака компоненты скорости необходимо сместить частоту одного из пучков так, чтобы разностная частота не проходила через нуль во всей области измеряемых скоростей.

Акустооптические устройства, основанные на дифракции света на бегущей ультразвуковой волне, позволяют в одной ячейке совместить операции расщепления и смещения частоты одного из пучков. Кроме того, применение двухкоординатной ячейки дает возможность одновременно измерять величину и направления двух ортогональных компонент вектора скорости. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть основные параметры наиболее перспективных акустооптических и пьезоэлектрических материалов в связи с теми требованиями, которые предъявляются к акустооптическим модуляторам-расщепителям лазерных доплеровских измерителей скоростей (ЛДИС).

Реальные оптические схемы ЛДИСов требуют получения углов расщепления оптических пучков не менее чем на 1° ; в оптимальном случае этот угол должен быть $2-3^\circ$. Оптимальное значение частоты модуляции, как правило, составляет $5-10$ МГц. Это связано с тем, что фотоприемники, используемые в схеме ЛДИСов, ограничены сверху частотой $\sim 50-100$ МГц, а рабочий диапазон частот устройства, определяющий интервал измеряемых скоростей, составляет величину ~ 20 МГц.

Разработка и создание акустооптического модулятора-расщепителя является сложной задачей, успешное решение которой зависит от правильного выбора материалов светозвукопровода, пьезопреобразователя, акустических поглотителей и связки, а также от используемой технологии изготовления. Ниже будут проанализированы материалы, которые могут применяться в различных элементах акустооптической ячейки.

Светозвукопроводы. Для заданной длины волны света ($0,63$ мкм), определяемой наиболее доступными гелий-неоновыми лазерами, удовлетворение указанным выше требованиям по углу расщепления и частоте мо-

Таблица 1

Материал	Плотность, 10^3 кг/м^3	Акустическая волна				Оптическая волна		Акустооптическая добротность, $M_2 = (n^2 p^2 / \rho v^3) \times 10^{-15} \text{ с}^2/\text{кг}$ ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$)
		Тип и направление распространения	Скорость, м/с	Поглощение, дБ/мкс при частоте 100 МГц	Импеданс, $10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	Направление поляризации	Показатель преломления ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$)	
Вода	0,997	Продольный	1490	3,5	1,49	II или I	1,33	126
Метилловый спирт	0,791	»	1120	3,4	0,89	II или I	1,329	475
n-Октан	0,702	»	1190	5,2	0,84	II или I	1,40	870
n-Гексан	0,655	»	1090	5,7	0,71	II или I	1,372	1050
Парателлуриг	6,00	Поперечный [110]	616	0,2	3,7	Круговая поляризация	2,26	793
Бромид — хлорид таллия (КРС-6)	7,15	То же	1020	0,41	7,3	II или I	2,3	880
Бромид — иодид таллия (КРС-5)	7,34	»	890	0,4	6,5	II или I	2,573	1200

дуляции исключает из всего многообразия акустооптических материалов их подавляющее большинство. Возможными для использования оказываются лишь такие материалы, скорости ультразвука которых ограничены величиной 10^3 м/с. К числу таких материалов относятся монокристаллы парателлуригта [3], бромида-иодида таллия (КРС-5) [4], бромида — хлорида таллия (КРС-6) [5] и большинство жидкостей [6]. В табл. 1 приведены основные акустооптические характеристики указанных выше материалов.

Монокристаллы парателлуригта обладают многими полезными свойствами: прозрачны во всей видимой области спектра, имеют высокую акустооптическую добротность, чрезвычайно низкую скорость поперечной волны, приемлемое в диапазоне частот до 100 МГц акустическое поглощение. Кроме того, эти кристаллы обладают высокой оптической активностью, что позволяет расширить оптическую полосу за счет перехода к анизотропной брэгговской дифракции. К сожалению, этот перспективный материал не освоен отечественной промышленностью, что, очевидно, определяет его высокую стоимость и делает практически недоступным для широкого использования.

Монокристаллы галогенидов таллия (КРС-5 и КРС-6) обладают высокой акустооптической добротностью, умеренным акустическим поглощением и низкой скоростью. Они освоены отечественной промышленностью в качестве материала для ИК- и лазерной техники. Однако оптическое качество этих кристаллов в видимой области спектра не отвечает требованиям, предъявляемым к модуляторам-расщепителям для ЛДИСов. Кристаллы КРС-5 и КРС-6, представляющие собой твердые растворы, имеют значительные внутренние напряжения, являющиеся результатом неоднородного распределения состава в процессе роста.

Это приводит к оптическим неоднородностям, которые можно устранить путем дополнительной специальной термообработки при температурах, близких к точке плавления. Термообработка сводится к двум типам отжига (высоко- и низкотемпературному при $400-410^\circ$ и 180°C соответственно), проводимым в атмосфере аргона в течение 30—72 ч [7]. Необходимо отметить, что при изготовлении светозвукопроводов акусто-

оптических устройств из кристаллов КРС-5 и КРС-6 особое внимание следует обращать на контроль однородности кристалла в поляризованном свете. Так, некоторые образцы, имеющие вполне удовлетворительные характеристики по пропусканию (50—65% для $\lambda = 0,63$ мкм), оказывались совершенно непригодными из-за неоднородности в поляризованном свете. Микроскопическое исследование таких образцов показало наличие ячеистой структуры с локальным изменением показателя преломления до 10^{-2} на миллиметр. Для получения однородных в поляризованных эффектах проводится окончательной термообработкой. Кристаллы КРС-5 и КРС-6 обладают явно выраженной анизотропией механических свойств. Микротвердость у них максимальна для направлений [100] и последовательно уменьшается для [110] и [111]. В связи с этим оптическое качество (пропускание, предел разрешения, однородность) поверхностей (100) существенно лучше, чем (110) и (111), что необходимо учитывать при изготовлении светозвукопроводов для акустооптических устройств.

Использование указанных выше технологических приемов позволило получить образцы светозвукопроводов из кристаллов КРС-5 и КРС-6, имеющих пропускание не менее 50 и 65% (в случае просветления пленкой MgF_2 — 80 и 90%), однородные в поляризованном свете, и снизить акустическое затухание до 0,2 и 0,4 дБ/мкс для продольных и поперечных волн на частоте 100 МГц.

Широкое применение жидкостей в качестве акустооптических сред ограничено значительной величиной акустического поглощения. Для жидкостей, как и для большинства твердых сред, характерна тенденция увеличения акустического поглощения с ростом акустооптической добротности. Для практического использования наиболее подходящей является вода, хотя она обладает невысокой акустооптической добротностью. Исследования акустооптических характеристик ряда органических жидкостей и их смесей позволили выявить среди них среды, превосходящие воду по акустооптической добротности в несколько раз и имеющие приблизительно такую же величину акустического поглощения. Существенным недостатком всех жидкостей является значительно большая по сравнению с твердыми средами (примерно на порядок) величина температурного коэффициента скорости ультразвука. Это обстоятельство приводит к недопустимому изменению угла расщепления при изменении температуры на 5—10°, поэтому жидкостные ячейки необходимо термостатировать. Не менее существенное ограничение при использовании жидких сред — возникновение в них конвекционных потоков, обусловленных неравномерным нагревом среды за счет акустического поглощения и приводящих к значительному ухудшению оптической неоднородности. Сведение к минимуму рабочего объема, введение специальных перегородок позволяют практически устранить появление оптической неоднородности за счет конвекции для акустооптических ячеек, имеющих дифракционную эффективность не более 50% и работающих в диапазоне частот до 50 МГц.

С целью увеличения угла расщепления и снижения частоты модуляции можно применять две последовательно расположенные акустооптические ячейки, имеющие высокие рабочие частоты.

Дифрагируя последовательно на двух звуковых пучках, распространяющихся навстречу друг другу, оптический луч изменяет свою частоту на величину, равную разности частот ультразвуковых пучков первой и

Таблица 2

Материал	Марка	Акустические свойства			Оптические свойства			Акустооптическая добротность, $M_e = \frac{(n^2 p_2 / \rho)^2 \times 10^{-15} \text{ с}^3 / \text{кг}}{\lambda = 0,63 \text{ мкм}}$	Источник	
		Плотность, 10^3 г/см^3	Скорость, 10^3 м/с	Полное значение, дБ/см при частоте 100 МГц	Термический коэффициент расширения, $d n / (dT \cdot 10^6)$ град ⁻¹	Область прозрачности, мкм	Показатель преломления, $(\lambda = 0,63 \text{ мкм})$			Термический коэффициент показателя преломления, $d n / (dT \cdot 10^6)$ град ⁻¹
Тяжелый флинт » Теллуридное стекло Te-W-Na-O Pb-Ge-Bi-O	ТФ-7	4,52	3,63	2,2	—	—	—	5,42	[8,9]	
	ТФ-8	4,23	3,14	2,0	—	—	—	4,2	[9]	
	СТФ-3	6,13	3,56	2,8	—	0,43—2,5	—	15,9	[9]	
	Опытное »	6,11 8,0	3,42 3,38	4,5 5,1	+76 +45	0,42—2,6 0,4—2,5	2,14 4,5	41 4,5	25 44	[9] [10]
Тяжелые флинты фирмы «Schott»	SF-8	—	3,89	2,0	—	—	—	6,3	[11]	
	SF-59	—	3,201	12,0	+81	—	—	21,3	[11]	
	U-10514	—	3,258	8,0	—	—	—	21,1	[11]	
	AOT-44 AOT-55	— 5,87	3,33 3,4	2,0 3,0	— —	0,43—2,7 0,47—2,7	2,05 2,09	20,0 24,0	[12] [12, 13]	
Теллуридные стекла										

второй ячеек. Такая схема модулятора-расщепителя предоставляет возможность получать невысокую частоту модуляции и большие углы расщепления ($1-5^\circ$), не накладывая ограничений на скорость ультразвука при выборе акустооптического материала. Кроме того, частота модуляции может изменяться от нуля до величины в несколько десятков мегагерц, что позволяет улучшить технические характеристики ЛДИСов. Для изготовления светозвукопроводов модуляторов-расщепителей в этом случае могут быть использованы освоенные промышленностью стеклообразные материалы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с кристаллами. К числу этих преимуществ относятся разнообразие размера и формы, оптическая однородность, достигаемая путем отжига, простота изготовления, изотропность, малая стоимость, доступность. В то же время стекла как акустооптические среды имеют ряд недостатков. Прежде всего, трудно получить стекла с показателем преломления выше 2,1, которые были бы прозрачны по всей видимой области спектра. Во-вторых, фотоупругие постоянные стекол в среднем на 20% ниже максимальных значений этих постоянных у соответствующих кристаллов. По этим причинам значения акустооптической добротности у них оказываются примерно вдвое ниже, чем у аналогичных кристаллов. Кроме того, в стеклах, как правило, высок уровень акустического поглощения, поэтому верхний предел частот при использовании большинства стекол не превышает 100 МГц.

Несмотря на указанные недостатки, стекла первыми нашли практическое применение в различных акустооптических устройствах, в том числе в модуляторах. В табл. 2 приведены акустооптические характеристики наиболее перспективных оксидных стекол. Следует заметить, что хотя среди халькогенидных стекол имеются составы [14, 15], обладаю-

Таблица 3

Материал	Плотность, 10^3 кг/м^3	Акустическая волна			Оптическая волна		Акустическая добротность, $M_2 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ ($\lambda=0,63 \text{ мкм}$)
		Тип и направление распространения	Скорость, м/с	Поглощение, дБ/мкс при частоте 400 МГц	Направление поляризации	Показатель преломления ($\lambda=0,63 \text{ мкм}$)	
Бифталат калия	1,636	Продольный [010]	2893	1,53	[100]	1,656	48
		»	2893	1,53	[001]	1,492	47
		Продольный [001]	3347	0,68	[100]	1,656	30
Бифталат цезия	2,173	»	3347	0,68	[010]	1,659	25
		Продольный [100]	3268	1,3	[100]	1,67	25
		»	3268	1,3	[010]	1,65	33
		Продольный [010]	2541	1,1	[100]	1,67	30
		»	2541	1,1	[001]	1,53	54
		Продольный [001]	2541	0,82	[100]	1,67	42
»	2541	0,82	[010]	1,65	29		
»	2541	0,82	[001]	1,53	21		

Примечание. Область прозрачности оптической волны 0,3—1,5 мкм.

щие очень высокой акустооптической добротностью ($\sim 10^3 \cdot 10^{15} \text{ с}^3/\text{кг}$), умеренным акустическим поглощением 2-3 дБ/см при частоте 100 МГц) и прозрачностью в красном диапазоне спектра, они не пригодны для практического использования из-за низкой оптической стойкости, высоких термических коэффициентов скорости звука ($\sim 300 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$) и показателя преломления ($30-50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), что обуславливает размытие дифракционной картины [16]. Величина акустического поглощения оксидных стекол ограничивает сверху рабочий диапазон частот 50—100 МГц, что соответствует углу расщепления, равному 1—2°. Для получения больших углов необходимо применять кристаллы, позволяющие расширить частотный диапазон до 150—200 МГц.

Однако использование схемы модулятора-расщепителя с двумя последовательно расположенными ячейками накладывает дополнительные требования на оптическую однородность, оптическое разрешение и пропускание на рабочей длине волны света. С учетом этих требований наиболее перспективными представляются материалы, обладающие высоким оптическим совершенством и пропусканием и умеренной акустооптической добротностью, чем материалы с обратным сочетанием свойств. Это связано с тем, что материалы с рекордно высокой акустооптической добротностью имеют высокие показатели преломления ($n > 2$). В процессе их роста и при механической обработке сравнительно легко создаются термические и механические напряжения, приводящие к значительной оптической неоднородности.

В табл. 3 приведены основные акустооптические характеристики монокристаллов бифталатов калия и цезия [17]. Максимальная величина акустооптической добротности для обоих бифталатов примерно в 1,5 раза превосходит эту величину для молибдата свинца. В то же время в этих кристаллах сравнительно высокая акустооптическая добротность обусловлена сочетанием высоких фотоупругих постоянных и низких плотности и скорости ультразвука.

Проведенный сравнительный анализ наиболее перспективных акустооптических материалов показывает возможность их применения в акустооптических модуляторах-расщепителях.

Пьезопреобразователи. Преобразователями ультразвука в модуляторах-расщепителях могут быть все известные типы: пластинчатые, пленочные, диффузионно-слоевые. Однако для рабочего диапазона частот до 150 МГц предпочтение следует отдать пластинчатым. Это связано с тем,

Т а б л и ц а 4

Материал	Тип волн, ориентация	Коэффициент электро-механической связи	Диэлектрическая проницаемость	Акустический импеданс, $10^4 \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$
Ниобат лития	$L36^\circ y$	0,49	38,6	33,9
	$S163^\circ y$	0,62	42,9	20,8
Иодат лития	Lz	0,53	6	18,5
	$L27^\circ y$	0,65	6,5	19
	Sy	0,63	8	11,3
Сульфид кадмия	Lz	0,15	9,53	21,7
	Sy	0,19	9,02	8,7
	$S40^\circ y$	0,21	9,3	10,1
Окись цинка	Lz	0,27	8,8	36,4
	Sy	0,31	8,3	16,4
	$S39^\circ y$	0,35	8,6	18,4

что в последнее время разработаны пьезоэлектрики, обладающие высокими пьезосвойствами (ниобат, танталат, иодат лития). В то же время технология получения структурно-совершенных пленок из этих материалов пока не отработана. Кроме того, при использовании пластинчатых пьезопреобразователей может быть осуществлена любая заданная кристаллографическая ориентация пластины, что важно для получения оптимальной эффективности преобразования, обеспечения хорошего подавления побочных мод и термостабильности характеристик. Эффективность преобразования в значительной степени определяется свойствами применяемых пьезоматериалов. Основные характеристики наиболее перспективных пьезоэлектрических материалов приведены в табл. 4. В таблицу включены данные работы [18] и результаты наших исследований по иодату лития [19, 20].

При выборе пьезоэлектрического материала, прежде всего, следует учитывать коэффициент электро-механической связи, так как акустооптический модулятор должен обладать высокой эффективностью. Необходимо также обратить внимание на согласование акустических и электрических импедансов пьезопреобразователя с акустическим импедансом звукопровода и электрическим электронно-ионной схемы. Как видно из табл. 4, наиболее перспективным пьезоэлектрическим материалом является иодат лития. Это связано с его более низким (примерно в два раза) значением акустического импеданса по сравнению с ниобатом лития, что особенно существенно при использовании акустооптических материалов с низким акустическим импедансом (парателлурита, бифталатов калия и цезия, галогенидов таллия, жидкостей). Кроме того, величина диэлектрической проницаемости иодата в шесть раз меньше соответствующей величины ниобата, что значительно облегчает согласование его электрического импеданса с импедансом стандартных электронных схем (50 и 75 Ом) без создания сложных в технологическом исполнении секционированных конструкций. К достоинствам иодата следует отнести и его низкую стоимость, что весьма существенно в случае промышленного освоения устройств. В то же время наибольшее распространение получил ниобат лития. Это связано с тем, что существуют значительные технологические трудности получения тонких пластин из иодата лития, так как эти кристаллы растворимы в воде, являются сильными окислителями и весьма чувствительны к температурным градиентам. Использование специальной технологии [21], включающей резку, шлифовку и полировку плас-

Таблица 5

Отвердитель, α Алюминий (порошок), 80	Акустический импе-		
Эпоксидная смола, 26,8 Отвердитель, 5,5 Медь, 66,7	—	5,4	3,9
Эпоксидная смола, 22,7 Отвердитель, 4,5 Никель, 72,7	—	6,1	1,8
Эпоксидная смола, 29 Отвердитель, 3 Вольфрам, 68	—	7	3,7
Галлиевые сплавы [23]	ГИСМ 65 ГИМ 25 ГОМ 60 ГОСМ 50 ГОИМ 55 ГАМ 65 ГМ 66 ГН 25	9 12 14 16,6 22 23 24 21,5	3,1 7,5 4,2 10,6 12,4 15 11 9,7
Висмутовые сплавы	Bi — 50% In — 50% Сплав Розе Сплав Вуда	16 18 20	10 12 12

тин, нанесение металлических электродов и соединение пластин со звукопроводом, позволяет создавать высокоэффективные и широкополосные ультразвуковые преобразователи на основе монокристаллов иодата лития. Эти пьезопреобразователи наиболее целесообразно применять при создании акустических модуляторов-расщепителей.

Акустические связи и поглотители. Большое значение имеет способ крепления пьезопластины к звукопроводу. При частотах до 150 МГц для этой цели применяются различные материалы (салол, стильбен, эпоксидная смола). Однако степень воспроизводимости характеристик преобразователя и его стабильность в этом случае неудовлетворительны. Это связано с тем, что акустические импедансы этих материалов существенно ниже акустических импедансов пьезопреобразователя и звукопровода. Известные методы термокомпрессии и холодной сварки на основе индия [22] практически непригодны для кристаллов галогенидов таллия и бифталатов калия и цезия из-за их низкой твердости и плохой адгезии к большинству металлов. В связи с этим в качестве акустических связей была использована эпоксидная смола, акустический импеданс которой удалось повысить в несколько раз путем введения в ее состав порошкообразных наполнителей из алюминия и вольфрама.

В связи с тем что акустооптический модулятор-расщепитель работает в режиме бегущих волн, необходимы акустические поглотители. Обычно в качестве поглотителей берут поликристаллические среды и пористую керамику, которые после механической обработки соединяют со

Таблица 6

Тип устройства	Материал светозвукопровода	Материал и тип пьезообразователя	Акустический поглотитель	Акустическая связка	Угол расщепления, град	К-ля, %	Напряжение модулирующего электрического сигнала, В	Оптическая апертура, мм
Двухкоординатный на одном светозвукопроводе	Паралеллурит (TeO ₂)	Ниобат лития, 163° y-срез	Эпоксидная смола с алюминиевым наполнителем	Эпоксидная смола с алюминиевым наполнителем	0,85		5	3
	Бромид — хлорид таллия (KPC-6)	Иодат лития, z-срез	Висмутовый сплав	То же	0,85		5	3
	n-Гексан	То же	Губка	—	0,75		8	4
Однокоординатный с дифракцией на двух ультразвуковых пучках	Теллуридное стекло (СТФ-3)	Ниобат лития, 36° y-срез	Висмутовый сплав	Индий	1,5		8	5
	Бифталат калия	Иодат лития, z-срез	Эпоксидная смола с алюминиевым наполнителем	Эпоксидная смола с алюминиевым наполнителем	2		8	5
	Бромид — иодид таллия (KPC-5)	Ниобат лития, 163° y-срез	Галлиевый сплав	Эпоксидная смола	5		5	3

звукопроводом акустической связкой. Хороший акустический контакт можно получить и без акустической связки, если поглотитель в пастообразном состоянии нанести непосредственно на звукопровод. В качестве таких поглотителей были использованы эпоксидные смолы с порошкообразными наполнителями, диффузионно-твердеющие сплавы галлия с различными металлами (медь, никель, индий и др.) и легкоплавкие сплавы висмута с индием и свинцом.

Акустические импедансы этих составов можно изменять в довольно широких пределах, варьируя тип и концентрацию наполнителей и компонентов сплавов. Состав и величины акустических импедансов ряда композиций приведены в табл. 5.

Сравнительные характеристики акустооптических модуляторов-расщепителей. В табл. 6 приведены основные технические характеристики двух вариантов акустооптических модуляторов-расщепителей, разработанных и созданных в ИФП СО АН СССР ($\lambda = 0,63$ мкм). Хотя двухкоординатное расщепление осуществимо путем применения двух каскадно включенных однокоординатных модуляторов-расщепителей, более перспективно расщепление с помощью одного двухкоординатного модулятора. Использование одной ячейки позволяет существенно упростить оптическую схему, снизить потери света, обеспечить более высокую компактность и стабильность рабочих параметров. В то же время двухкоординатные ячейки конструктивно более сложны и предъявляют повышенные требования к термической стабильности параметров.

Как видно из таблицы, по своим техническим характеристикам двухкоординатные ячейки модуляторов-расщепителей на основе монокристаллов парателлурита и КРС-6, а также n -гексана примерно одинаковы. В то же время по своим эксплуатационным параметрам они существенно различаются. Так, для жидкостной ячейки достигнутая величина дифракционной эффективности является предельной из-за возникновения конвекционных потоков, значительно ухудшающих оптическое качество светозвукопровода. Кроме того, эта ячейка заметно изменяет свои параметры с изменением окружающей температуры. Однако в тех случаях, когда не обязательны высокие дифракционная эффективность и стабильность параметров, жидкостная ячейка существенно дешевле, доступней, проще.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yeh Y., Cummins H. Z. Localized Fluid Flow Measurements with an He-Ne-Laser Spectrometer.— Appl. Phys. Lett., 1964, vol. 4, p. 176.
2. Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С. Принципы построения лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС).— В кн.: Когерентно-оптические доплеровские устройства в гидроаэродинамическом эксперименте. Новосибирск: изд. ИАП СО АН СССР, 1974, с. 3—39.
3. Утида, Нидзэки. Материалы и методы акустооптического отклонения.— ТИИЭР, 1974, № 11.
4. Шелопут Д. В. и др. Акустооптические характеристики монокристаллов КРС-5.— ОМП, 1977, т. 8, с. 36—38.
5. Шелопут Д. В., Семенов В. И., Сапожников В. К., Авдиченко К. И. Акустические характеристики монокристаллов КРС-6.— ФТТ, 1976, т. 8, вып. 9.
6. Богданов С. В., Шелопут Д. В. Материалы для акустических устройств.— В кн.: Свойства материалов, используемых в устройствах оптоэлектроники. Красноярск: изд. Ин-та физики СО АН СССР, 1975.
7. Шелопут Д. В. и др. К выбору материала и исследованию акустооптических параметров светозвукопроводов дефлекторных ячеек.— Автометрия, 1975, № 3.
8. Клузин В. В., Кулаков С. В., Разживин Б. П., Ульянов Г. К. Возможность применения тяжелых флинтгов для ультразвуковой модуляции света.— ОМП, 1972, № 1.
9. Семенов В. И., Шелопут Д. В. Акустические характеристики теллуридных стекол.— Автометрия, 1979, № 2.
10. Турияца И. Д. и др. Фотоупругость стекол системы Ge—Pb—Bi—O.— Акуст. журн., 1978, т. XXIV, вып. 4.

11. Eschler H., Weidinger F. Acousto-Optic Properties of Dense Flint Glasses.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, N 1.
12. Izumitani T., Mosuda J. An Effect of Irradiation of As_2Se_3 Glass.— Ceramic Soc. Japan, 1974, N 5.
13. Lano T., Fukumoto A., Watanabe A. Tellurite Glass: a New Acousto-Optic Material.— J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, p. 3674.
14. Шелопут Д. В. и др. Халькогенидное стекло. (Автор. свид-во № 370572.) — БИ, 1973, № 11.
15. Шелопут Д. В., Глушков В. Д., Туряница И. Д., Коперлиус Б. М. Халькогенидное стекло. (Автор. свид-во № 565892.) — БИ, 1977, № 27.
16. Зубринов И. И., Шелопут Д. В. Эффект акустотермической фокусировки лазерного луча в халькогенидных стеклах и прустите.— ФТТ, 1975, т. 17, с. 944.
17. Писаревский Ю. Оптико-акустическое взаимодействие в кристаллах каломели и бифталатов щелочных металлов: Автореф. на соиск. учен. степени канд. физ. наук. М.: изд. Ин-та кристаллографии, 1974.
18. Meitzler A. H. Piezoelectric Transducer Materials and Techniques for Ultrasonic Device Operating above 100 MHz.— In: Ultrasonic Transducer Material/Ed. O. E. Matiat. New York: Plenum, 1971.
19. Авдиенко К. И., Семенов В. И., Шелопут Д. В. Зависимость пьезоэлектрических свойств и характеристик ультразвуковых преобразователей от направления среза в кристаллах иодата лития.— В кн.: ВИМИ РИПОРТ. № 5. М.: изд. ВИМИ, 1975.
20. Авдиенко К. И., Богданов С. В., Семенов В. И., Шелопут Д. В. Оптические, акустические и пьезоэлектрические свойства кристаллов иодата лития.— Известия АН СССР. Сер. Физика, 1977, т. 41, № 4.
21. Sheloput D. V., Avdienko K. I., Kidiyov B. J. Growth of α - $LiIO_3$ Crystals of High Piezoelectric and Optical Quality.— J. Cryst. Growth, 1977, vol. 42, p. 228—233.
22. Зиттиг, Кук. Метод изготовления и крепления ультразвуковых преобразователей, используемых в высокочастотных цифровых линиях задержки.— ТИИЭР, 1968, т. 56, вып. 8.
23. Шелопут Д. В., Рыбакова Л. А., Шелопут Т. А., Зубринов И. И. Материал для звукопоглотителей. (Автор. свид-во № 546006.) — БИ, 1977, № 5.

Поступила в редакцию 31 мая 1977 г.

УДК 535.4 : 778.38

В. В. ДОНЦОВА, Г. А. ЛЕНКОВА
(Новосибирск)

КИНОФОРМНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ РАСТРА

В настоящее время актуальной является задача получения линзового растра, применяемого в фотолитографии для мультипликации изображений [1] и создания равномерного освещения [2]. Обычно линзовый растр изготавливается голографическим методом [3] или путем проецирования с уменьшением зонной пластинки Френеля [4, 5]. Теоретическая дифракционная эффективность этих методов не превосходит 30 и 40% соответственно.

В предлагаемой работе исследуется возможность получения короткофокусной киноформной линзы для растра путем проецирования с уменьшением специального полутонного фотошаблона, имеющего пропускание, близкое к профилю фазовой линзы Френеля. Теоретически дифракционная эффективность таких линз может составлять 100%. Фотошаблон представлял фотографию колец интерферометра Фабри — Перо в отраженном свете [6]. В нашем случае толщина интерферометра составляла 25 и 50 мм, при этом расположение колец в интерференционной картине соответствовало зонным пластинкам с фокусами $f_0 = 1800$ и 900 мм. Качество фотошаблонов исследовалось аналогично [7] и позволяло использо-