

Многоканальный модулятор излучения линейки лазерных диодов

С.И.Державин, В.В.Кузьминов, Д.А.Машковский, В.Н.Тимошкин

Экспериментально исследована возможность создания многоканального электрооптического модулятора лазерного излучения с большой дифракционной расходимостью и малой длиной когерентности и описана его конструкция.

Ключевые слова: линейка лазерных диодов, электрооптический модулятор, параметр качества, дифракционная расходимость.

1. Выбор схемы и материала модулятора

Разработка новых оптических систем записи и воспроизведения больших объемов информации требует создания многоканальных модуляторов света. Для миниатюризации устройств используется излучение диодных лазеров, но оно имеет большую дифракционную расходимость, что сильно затрудняет работу модулятора света. Настоящая статья посвящена решению проблемы большой расходимости и малой длины когерентности диодных лазеров при работе с электрооптическими модуляторами.

Реализация электрооптического модулятора света возможна на основе таких известных кристаллов, как, например, KDP, ADP, GaAs, ZnS, ZnTe, LiNbO₃, LiTaO₃, BaTiO₃. Целесообразность использования того или иного кристалла в модуляторе зависит от его группы симметрии, которая определяет свойства кристалла. В нашей работе выбор типа кристалла основывался на следующих требованиях:

- 1) возможность работы модулятора с излучением с длиной волны $\lambda = 0.8$ мкм и шириной спектра $\Delta\lambda = 3$ нм (характерных для мощных линеек лазерных диодов);
- 2) минимизация рабочего напряжения ($V < 350$ В);
- 3) эффективность модуляции на низких частотах (до 100 кГц);
- 4) минимизация деструктивной роли эффектов, сопутствующих высокой плотности каналов, высокой мощности излучения (до 100 мВт в одном канале) и параметру качества пучка $M^2 = 5$ при глубине модуляции не хуже 90 %;
- 5) отсутствие необходимости в термостабилизации (что избавляет от необходимости использования теплообменника и упрощает конструкцию);
- 6) возможность миниатюризации конструкции (что включает в себя и снятие ограничений по стоимости материалов).

С.И.Державин, В.В.Кузьминов, Д.А.Машковский, В.Н.Тимошкин.
Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991
Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: derzh@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 8 декабря 2006 г., после доработки – 6 февраля 2007 г.

Проведенный нами анализ различных кристаллов и схем модуляторов показал, что большинство из названных выше кристаллов не отвечает перечисленным требованиям. Так, работа с кристаллами KDP и ADP (группа симметрии $\bar{4}2m$) требует высокой монохроматичности излучения с $\Delta\lambda$, определяемым соотношением [1]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \leq \frac{\lambda}{4(n_e - n_o)L}, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; n_o и n_e – показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн соответственно; L – длина кристалла. Для этих кристаллов при типичном значении $L = 10$ мм ширина линии излучения источника, по оценке, составляет около нескольких ангстрем, что на порядок меньше ширины спектра линейки лазерных диодов. Кроме того, изменение показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн в зависимости от температуры приводит к необходимости термостабилизации этих кристаллов, т. к. появляется дополнительная разность фаз в 23° , вызванная изменением температуры ΔT всего на 0.01°C [1]. Хотя данный деструктивный эффект и может быть устранен за счет использования двух последовательно расположенных кристаллов с надлежащим выбором полярности модулирующего напряжения, технически это усложняет схему модулятора.

Использование кубических кристаллов GaAs, ZnS, ZnTe (группа $\bar{4}3m$) имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием кристаллов KDP и ADP, что связано с отсутствием в кубических кристаллах естественного двулучепреломления. Это обстоятельство позволяет применять такие кристаллы в модуляторах с угловой апертурой 10° и более, а также снизить требования к монохроматичности излучения и температурной стабилизации модулятора при использовании поперечного электрооптического эффекта [1]. Однако применение этих кристаллов ограничено сложностью изготовления больших образцов с высоким оптическим качеством. Тем не менее кристаллы на основе GaAs находят применение в модуляторах, работающих в диапазоне длин волн $\lambda = 0.8 - 16$ мкм.

Кристалл BaTiO₃ (группа $4mm$) оптического качества обладает высокой электрооптической постоянной, одна-

ко является дорогостоящим, и, насколько нам известно, в настоящее время не производится в России.

В результате нами был выбран модулятор на основе кристалла LiNbO_3 (группа симметрии $3m$), работающий с использованием поперечного линейного электрооптического эффекта (эффекта Погкельса). Этот кристалл удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям, кроме четвертого, для выполнения которого нужны дополнительные экспериментальные исследования, связанные с необходимостью учета конкретных физических и технических ограничений, возникающих при работе с модулятором.

2. Параметры модулятора на основе LiNbO_3

В использовавшейся нами экспериментальной схеме (рис.1) оптическая ось кристалла LiNbO_3 была ориентирована по направлению распространения модулируемого излучения – по оси z , излучение было линейно поляризовано по оси y . Электрическое напряжение, обуславливающее поперечный электрооптический эффект, прикладывалось к граням кристалла LiNbO_3 , нормальным к оси x . Требуемое для работы напряжение определяется по формуле

$$V = \frac{d}{2L} V_{\lambda/2}, \quad V_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{22}}, \quad (2)$$

где $V_{\lambda/2}$ – полуволновое напряжение; d – толщина кристалла; $n_o = 2.29$; r_{22} – электрооптический коэффициент, равный 3.4×10^{-10} см/В для LiNbO_3 .

Анализ формулы (2) показывает, что подбором отношения L/d можно значительно уменьшить прикладываемое к модулятору напряжение. Согласно оценкам, при $L = 10$ мм и $d = 0.5$ мм имеем $V \sim 250$ В.

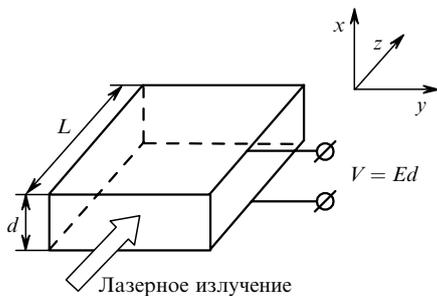


Рис.1. Поперечный модулятор света.

3. Ограничения при работе с модулятором

При проектировании многоканальных электрооптических модуляторов необходимо учитывать факторы, влияющие на пропускание и контраст системы. К числу таких факторов относятся следующие: дифракция излучения, взаимное влияние каналов, оптически наведенное изменение двулучепреломления (фоторефрактивный эффект) [1] при использовании излучения с высокой плотностью мощности, а также вторичный электрооптический эффект [2].

3.1. Дифракционные ограничения

Деструктивная роль дифракции излучения проявляется в снижении глубины модуляции вследствие допол-

нительного (по отношению к параллельному пучку) набега фазы излучения в пучке непараллельных лучей. Это ограничивает допустимый угол расходимости входного пучка, что в большинстве случаев является серьезным недостатком.

Известно, что в паракиальном приближении выражение для двулучепреломления кристалла имеет вид [3]

$$\Delta n \approx \frac{n_o^2}{2} \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \varphi^2, \quad (3)$$

где φ – угол отклонения светового пучка от оптической оси. При падении на кристалл линейно поляризованного излучения выражение для прозрачности модулятора T в системе скрещенных поляризаторов имеет вид [2]

$$T = \frac{\langle E_{in}^2 \rangle}{\langle E_{out}^2 \rangle} = \sin^2 2\beta \sin^2 \left[\frac{\pi L}{\lambda} \frac{n_o^3}{2} \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \varphi^2 \right], \quad (4)$$

где $\langle E_{in}^2 \rangle$ и $\langle E_{out}^2 \rangle$ – средние по периоду колебания квадраты амплитуд поля на входе и выходе соответственно; β – азимутальный угол падения пучка.

При наличии внешнего модулирующего поля вид формул (3) и (4) изменяется. Однако, как показано в [3], для используемого в работе кристалла LiNbO_3 угловая апертура элементов модулятора с приложенным внешним полем и в отсутствие поля примерно одинакова и определяется соотношением

$$T = \sin^2 2\beta \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} A_{\lambda/2} \right), \quad (5)$$

где величина

$$A_{\lambda/2} = \frac{2Ln_o^3 \varphi^2}{\lambda} \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \quad (6)$$

имеет смысл отношения разностей фаз, обусловленных отклонением пучка от оптической оси и наведенным полуволновым полем. Таким образом, увеличение угловой апертуры φ достигается использованием кристаллов с меньшим двулучепреломлением, либо уменьшением длины кристалла, что не всегда возможно. Исходя из приведенных формул (3)–(6), оценка угловой апертуры дает значение в несколько миллирадиан для кристалла LiNbO_3 ($n_o = 2.29$, $n_e = 2.20$) при $L = 10$ мм, $\lambda = 0.8$ мкм и требуемом уровне глубины модуляции не хуже 90 %.

В настоящей работе значение угла φ определялось экспериментально по схеме, представленной на рис.2. Пучок излучения, выходящий из волокна 1 диаметром 200 мкм, коллимировался с помощью линзы 2 и направ-

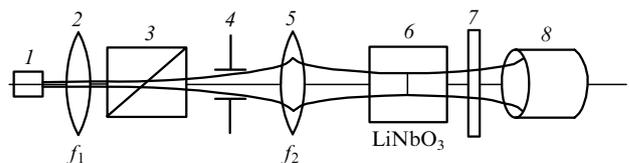


Рис.2. Оптическая схема измерений параметров модулятора:

1 – пучок излучения, выходящий из волокна; 2 – коллимирующая линза; 3 – призма Глана; 4 – диафрагма; 5 – фокусирующая линза; 6 – кристалл LiNbO_3 ; 7 – анализатор; 8 – измеритель мощности; $f_1 = 1$ см и $f_2 = 20$ см – фокусные расстояния линз 2 и 5 соответственно.

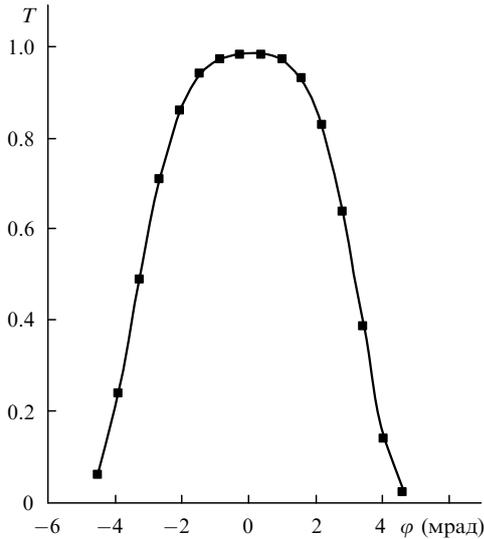


Рис.3. Угловая зависимость пропускания модулятора.

лялся на призму Глана 3 (возможно использование другого элемента, но необходимо быть уверенным в том, что он выдержит интенсивность падающего излучения) для получения поляризованного излучения. Далее пучок диафрагмировался (диаметр диафрагмы 4 составлял 2 мм), а затем фокусировался линзой 5 на пробный кристалл LiNbO₃ 6 так, чтобы при выбранных параметрах оптической системы он имел диаметр в перетяжке 4 мм и плоский волновой фронт в пределах кристалла. Поляризация пучка, прошедшего через кристалл LiNbO₃, исследовалась анализатором 7 совместно с измерителем мощности 8. При выбранных параметрах оптической схемы мощность излучения P_{in} после прохождения диафрагмы 4 составила 250 мВт при токе накачки I = 13 А.

На рис.3 представлена угловая зависимость пропускания излучения модулятором. Видно, что для обеспечения работоспособности модулятора угол φ не должен превышать φ_{max} ≈ 1 – 2 мрад. Исходя из угловых ограничений, а также параметра качества пучка M² = 5, определялась геометрия макетного образца. Для этого было необходимо установить связь между параметрами L, d, φ и V.

В гауссовом приближении для ширины пучка w(z) по уровню 1/e (по полю) имеем выражение

$$w^2(z) = w_0^2 + \left(\frac{M^2\lambda}{\pi w_0}\right)z^2,$$

где w₀ – радиус перетяжки пучка; z – координата пучка вдоль оси его распространения. Определим локальный угол θ(z):

$$\theta(z) = \frac{dw(z)}{dz} = \theta_{\max} \frac{z}{(w_0^2 + \theta_{\max}^2 z^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

где

$$\theta_{\max} = \frac{M^2\lambda}{\pi w_0}$$

– угол в дальней зоне. С учетом указанных выше угловых ограничений имеем следующие выражения:

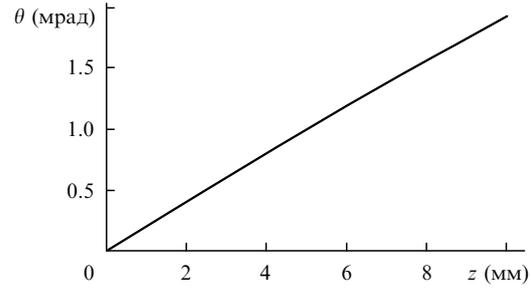


Рис.4. Зависимость локального угла θ от координаты z при w₀ = 0.15 мм и M² = 5.

$$\theta(z) \leq \varphi_{\max}, \quad (8)$$

$$M^2 = \frac{\pi w_0 \theta_{\max}}{\lambda} = 5.$$

Расчет по формуле (7) с учетом (8) дает длину L и толщину d модулятора.

Алгоритм определения параметров модулятора состоит в следующем. Исходя из свойств используемой в экспериментах линейки лазерных диодов с мощностью излучения 12 Вт (модель HLU20F400) в непрерывном режиме, снабженной волоконным выводом, модифицируем оптическую схему и обеспечиваем источник излучения с требуемым параметром качества пучка (M² = 5). Диаметр перетяжки подбирался таким, чтобы на ее длине порядка L = 10 мм расходимость излучения не превысила φ_{max} ≈ 1 мрад. В нашем случае это давало w₀ ≈ 0.15 мм. При этом мощность излучения, падающего на модулятор, P_{in} составляет 22 мВт при токе I = 20 А. Полученные экспериментальные значения соответствуют рассчитанным по формуле (7) при условии (8) и дополнительном учете уменьшения диаметра перетяжки из-за распространения света в среде с показателем преломления n = 2.2. Результаты расчета приведены на рис.4.

Таким образом, при диаметре перетяжки по полю 2w₀ = 0.3 мм и размерах кристалла L = 10 мм и d = 2(w₀ + δ) = 0.5 мм (где δ – эмпирический параметр) дифракционные ограничения удовлетворены.

Поскольку существует возможность уменьшения напряжения V(2) при увеличении длины L, то возникает задача оптимизации, т. к. параметры L и d взаимосвязаны. Поэтому макетные образцы были изготовлены в четырех вариантах с различными параметрами, значения которых приведены в табл.1. Для предотвращения повреждения оптических торцов модулятора при монтаже электродов во всех образцах длина модулятора L_m на 1 мм превышала длину электрода L_e.

Табл.1. Ограничения, обусловленные взаимным влиянием каналов.

| L _m (мм) | L _e (мм) | d (мм) | V (В) |
|---------------------|---------------------|--------|-------|
| 11 | 10 | 0.5 | 265 |
| 11 | 10 | 0.6 | 280 |
| 16 | 15 | 0.8 | 290 |
| 16 | 15 | 1.0 | 360 |

После определения толщины кристалла d находим ширину электрического контакта s. Для этого экспериментально исследовалось пропускание одного канала модулятора при различных значениях s. Оптическая схема эксперимента приведена на рис.5.

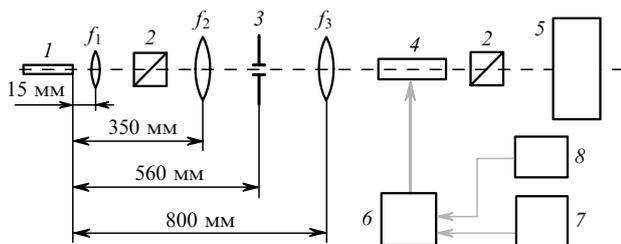


Рис.5. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – световодный вывод HLU12F400-808; 2 – призма Глана; 3 – диафрагма диаметром 0,5–1 мм; 4 – модулятор; 5 – измерительные приборы (измеритель мощности или фотоприемник с осциллографом); 6 – пятиканальный блок управления; 7 – генератор прямоугольных импульсов длительностью до 10 мкс с частотой повторения до 100 кГц и напряжением 5 В; 8 – источник постоянного напряжения до +500 В; $f_1 = 12$ мм; $f_2 = 250 - 320$ мм; $f_3 = 70$ мм.

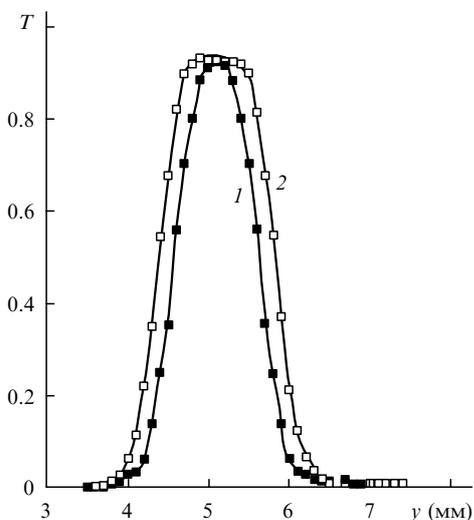


Рис.6. Пропускание модулятора для $s = 0.6$ (1) и 0.9 мм (2).

Учитывая, что для эффективной модуляции излучения приложенное к кристаллу электрическое поле должно быть однородным в области распространения пучка, мы использовали ширины контактов $s = 0.9$ и 0.6 мм для модуляторов толщиной $d = 0.5$ мм. На рис.6 показано пропускание модулятора с $d = 0.5$ мм. Представленные зависимости определяют выбор оптимальной ширины контакта $s = 0.6$ мм ввиду отсутствия в этом случае ярко выраженной горизонтальной «полочки» на кривой пропускания, которая видна при $s = 0.9$ мм. Эта «полочка» определяет избыточную ширину электрода. Наличие узкого максимума для $s = 0.6$ мм, находящегося на уровне «полочки», свидетельствует о том, что при дальнейшем уменьшении ширины электрода будет снижаться пропускание канала.

При токе накачки диода $I = 15$ А мощность падающего на кристалл излучения $P_{in} = 30$ мВт, после прохождения излучения через модулятор в отсутствие приложенного поля ($V = 0$) выходная мощность $P_{out} = 21.3$ мВт, а при наличии поля ($V = 280$ В) – 1.1 мВт. В результате получаем отношение $P_{out}(V = 0)/P_{out}(V = 280 \text{ В}) = 19.37$. При токе $I = 20$ А ($P_{in} = 52$ мВт) аналогичное отношение составляет 18.1.

3.2. Взаимное влияние каналов

При расположении электродов на гранях кристалла (рис.7) необходимо учитывать взаимное влияние сосед-

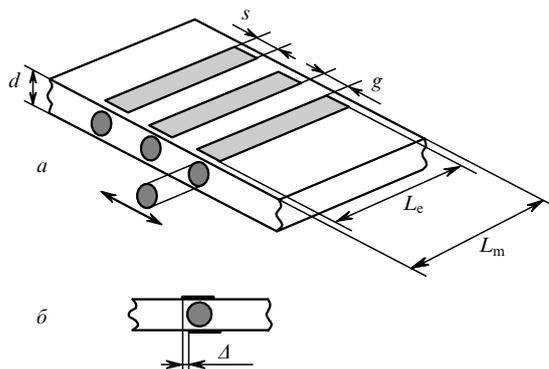


Рис.7. Схема эксперимента по определению необходимой ширины зазора между электродами.

них каналов, которое проявляется в перераспределении управляющих полей в области включенных каналов, в проникновении полей включенных каналов в области выключенных каналов, а также в электростатической индукции зарядов на соседних электродах. Последнее обстоятельство, как показал эксперимент, несущественно, т.к. пары соседних электродов оказываются накоротко замкнутыми выходным сопротивлением электронных блоков управления. Влияние на отдельный канал всех других каналов, кроме соседних, достаточно слабое, что связано как с быстрым убыванием поля на границе плоского конденсатора, так и с экранирующим действием электродов соседних каналов. Перераспределение полей ведет к неоднородности пропускания полностью открытого канала при коммутации соседних каналов, а их проникновение в соседние каналы – к снижению контраста модулятора, также зависящего от коммутации каналов.

Для проведения серии экспериментов по определению минимальной ширины зазора между электродами на модуляторе g (рис.7) были изготовлены образцы с зазором $g = 1.2, 1.1, 1.0, 0.9$ и 0.8 мм. Отрицательные электроды были соединены между собой тонким монтажным проводом, что не повлияло на эффективность работы модулятора, но позволило упростить подвод электрического напряжения за счет использования одного провода с нижней стороны модулятора, который, в свою очередь, оказалось возможным разместить на тefлоновом основании, а не крепить только за боковые грани (рис.7). Ширина электродов s составляла 0.5 и 0.6 мм, толщина модулятора $d = 0.5$ мм.

Во время исследования снималась зависимость пропускания лазерного излучения от его перемещения по поперечной координате относительно оптической оси при попеременном включении двух соседних каналов. Минимальная ширина зазора g , при которой влияние соседнего канала на исследуемый еще не сказывается, по результатам экспериментов составила 0.8 мм. Это следует из зависимостей, приведенных на рис.8. Кривые 1 и 2 соответствуют пропусканию каждого из двух каналов при выключенном соседнем. Линии 3 показывают положение электродов. Видно, что при прохождении пучка через точку $y = 5.1$ мм для одного канала и точку $y = 6.6$ мм для другого канала модулятор имеет наибольшее пропускание. Эти же точки являются центрами электродов. Но самое главное, в точке $y = 5.1$ мм кривая 1 и в точке $y = 6.6$ мм кривая 2 имеют минимумы, т.е. при расположении пучка излучения точно под осевой линией

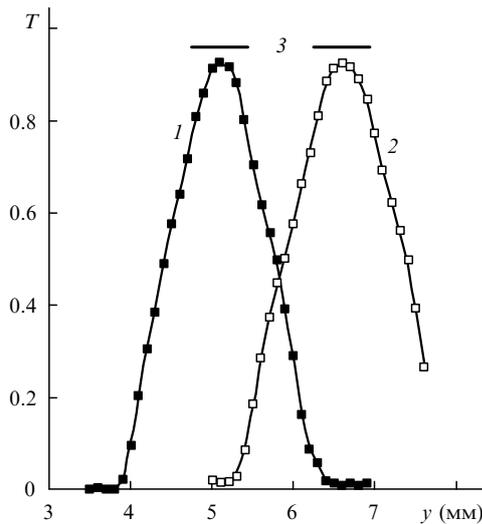


Рис.8. Пропускание двух соседних каналов (1, 2) при их поперечном включении в зависимости от перемещения оптического излучения по поперечной координате y . Линии 3 – положения электродов.

электрода он не будет испытывать влияния соседнего канала. Таким образом, при толщине модулятора 0.5 мм зазор между электродами должен быть не менее 0.8 мм.

3.3. Ограничения, обусловленные фоторефракцией

Одной из особенностей использования модуляторов является высокая плотность мощности излучения, обусловленная малой линейной апертурой модулятора и относительно высокой мощностью излучения, требуемой для технологической обработки. При мощности излучения 100 мВт в одном канале плотность мощности может достигать 1 кВт/см^2 .

При столь высоких плотностях мощности лазерное излучение может индуцировать изменение величины двулучепреломления вследствие фотогенерации и последующего захвата фотовозбужденных электронов ловушками. Перераспределение зарядов вдоль оси спонтанной поляризации, вызванное этим процессом, ведет к изменению внутрикристаллического поля, которое связано через электрооптический эффект с показателем преломления. Коротковолновое излучение оказывает большее влияние на фоторефрактивный эффект вследствие возможности возбуждения носителей заряда с более глубоких уровней запрещенной зоны кристалла [4]. При облучении кристалла LiNbO_3 лазерным излучением с $\lambda = 488 \text{ нм}$ перпендикулярно оптической оси эффект проявляется при плотностях мощности в несколько Вт/см^2 . Облучение же вдоль оптической оси (как в выбранной нами конфигурации) не приводит к индуцированию двулучепреломления [5]. При использовании излучения с $\lambda = 532 \text{ нм}$ заметного проявления фоторефрактивного эффекта не наблюдалось при плотности мощности вплоть до $10 \text{ МВт} \times \text{см}^{-2}$, а при $\lambda = 1064 \text{ нм}$ этот эффект не регистрировался при плотности мощности до 5 кВт/см^2 . Нами было исследовано проявление фоторефрактивного эффекта для используемой в нашей задаче длины волны $\lambda = 800 \text{ нм}$.

Анализ проявления фоторефрактивного эффекта основан на регистрации поворота осей поляризации излучения, проходящего через модулятор. В эксперименте излучение мощностью $P_{\text{in}} = 3.8 \text{ Вт}$, падающее на модулятор, фокусировалось в пятно диаметром 0.3 мм, что соответствует плотности мощности $\sim 5 \text{ кВт/см}^2$. При вы-

ключенном и включенном напряжении на контактах модулятора не было зарегистрировано заметного поворота эллипса поляризации. Таким образом, полученный результат позволяет не учитывать деструктивную роль фоторефракции для требуемой мощности $P_{\text{in}} = 100 \text{ мВт}$ излучения, падающего на канал модулятора толщиной $d = 0.5 \text{ мм}$ и больше.

3.4. Ограничения, обусловленные вторичным электрооптическим эффектом

Потенциально высокое быстродействие электрооптического эффекта, определяемое временем поляризации ($\sim 10^{-14} \text{ с}$), ограничивается искажениями амплитудно-частотных характеристик модулятора, связанными с пьезоэлектрическими резонансами. Вследствие одинаковой симметрии электрооптического и пьезоэлектрического эффектов все среды, обладающие одним из этих эффектов, непременно обладают и другим. Это означает, что прикладываемое к электрооптическому кристаллу переменное электрическое поле помимо электронной или решеточной поляризации, ответственной за изменение оптических свойств, приводит к возникновению волн упругих напряжений. При совпадении частот управляющего напряжения с частотами механических резонансов кристалла, зависящих от его геометрических размеров и упругих свойств, образуются стоячие волны, т. е. возникает пьезоэлектрический резонанс. При этом возникающие упругие напряжения вследствие упругооптического эффекта изменяют оптические параметры электрооптического кристалла, что может рассматриваться как результат добавочного вклада в электрооптический эффект, называемого вторичным электрооптическим эффектом, и приводят к искажению амплитудно-частотных характеристик кристалла. Эти искажения практически невозможно скорректировать радиотехническими методами, поскольку спектр резонансных частот весьма широк, а добротность таких резонаторов превышает десятки тысяч.

По типу возбуждения упругих волн электрооптические элементы представляют собой резонансные структуры, которые хорошо изучены [1]. Показано, что в них первые резонансы наблюдаются на частотах управляющих воздействий $f_k = vk/(2d)$, где v – скорость звука в среде, а k – номер гармоники.

Сложность аналитического описания пьезоэлектрического возбуждения электрооптического элемента, особенно в случае неоднородного распределения управляющих полей, имеющих место в многоканальных модуляторах света, вынуждает использовать эмпирическое описание этого процесса. Кроме того, большое число одновременно работающих каналов и их произвольная коммутация дополнительно обогащают спектр собственных частот. Учитывая эти факторы, все резонансные частоты можно условно разделить на две группы: частоты резонансов, при образовании которых отражениями от боковых граней элемента можно пренебречь, и частоты резонансов, в образовании которых существенную роль играют отражения от боковых граней элемента. Естественно, первая группа является более высокочастотной. Частоты первых резонансов в этой группе зависят от толщины элемента и при ее практически реализуемых значениях (0.5–1 мм) лежат в области 2–4 МГц. Этим диапазоном частот и определяется ширина полосы модулятора.

Из приведенных выше оценок следует, что в нашем случае низких частот (не более 100 кГц) и используемых толщин резонаторов (не менее 0.5 мм) пьезоэффект не должен проявляться. Однако длительности фронтов импульсов ~ 200 нс, используемые в эксперименте, могут служить причиной появления пьезоэлектрического эффекта.

Наши экспериментальные исследования незакрепленного модулятора толщиной 0.5 мм показали наличие резонансов электрических колебаний на частотах около 100 кГц при напряжении на кристалле 320 В. Они проявлялись в виде незначительной ($\sim 6\%$) модуляции вершин амплитуд импульсов напряжения. Крепление модулятора на основании эластичным компаундом привело к полному исчезновению резонансов вплоть до напряжений 500 В и частот следования 120 кГц. При этом мы не использовали дополнительных покрытий модулятора. На оптических импульсах эта модуляция напряжения не была зарегистрирована.

Пьезоэффект также служит причиной нагрева модуляторов. В экспериментах температура модулятора контролировалась с помощью тепловизионной камеры с погрешностью $\pm 2^\circ\text{C}$. В пределах этой погрешности изменения температуры обнаружено не было. Данный результат косвенно свидетельствует об отсутствии существенного проявления пьезоэффекта.

4. Электрическая схема модулятора

Источник питания модулятора состоит из транзисторных ключей для каждого канала и пятиканального задающего генератора. Частота и параметры электрических импульсов определяются внешним генератором для каждого канала отдельно. Величина управляющего напряжения зависит от параметров модулятора, но не должна превышать $+500$ В. Для работы одного канала модулятора необходим источник питания с током 50 мА и напряжением до $+500$ В.

Для обеспечения требуемых длительностей фронтов импульсов (менее 1 мкс) и стабильной работы прибора на высоких частотах (до 100 кГц) была использована ключевая схема с двумя полевыми транзисторами IRF 830 и

стандартным драйвером IR 2104, рекомендуемая фирмой International Rectifier. Подобные схемы были собраны для каждого из пяти каналов и запитывались от одного источника высокого напряжения. Для уменьшения возможного влияния пьезоэффекта ключевая схема обеспечивала длительности нарастания и спада импульса не менее 200 нс.

Схема окончательной версии макета пятиканального модулятора представлена на рис.7,а. Толщина модулятора $d = 0.5 \pm 0.02$ мм, ширина электродов $s = 0.6 \pm 0.005$ мм, расстояние между электродами $g = 0.8 \pm 0.01$ мм, длина электродов $L_e = 10$ мм, длина модулятора $L_m = 11$ мм, погрешность позиционирования верхнего и нижнего электродов $\Delta = \pm 0.025$ мм (рис.7,б), непараллельность электродов составила не более шести угловых минут. Представленные погрешности позиционирования позволили получить глубину модуляции излучения 92% при мощности излучения, падающего на канал, 52 мВт и параметре качества пучка $M^2 = 5$.

5. Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных работ был создан макетный образец пятиканального электрооптического модулятора на основе кристалла LiNbO₃. Прибор рассчитан на модуляцию непрерывного излучения с длиной волны 0.8 мкм и мощностью в одном канале до 100 мВт. Частота модуляции излучения составляла не более 100 кГц, глубина модуляции – 92%.

Выражаем большую признательность Л.Б.Архонтову за проявленное внимание к нашей работе.

Работа была выполнена при поддержке фирмы LIMO (Германия).

1. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. *Методы модуляции и сканирования света* (М.: Наука, 1970).
2. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. *Основы кристаллофизики* (М.: Наука, 1979).
3. Архонтов Л.Б., Гераськин В.В., Киселев Б.С. *Кристаллография*, **27**, 528 (1982).
4. Chen P.S. *J. Appl. Phys.*, **40**, 3389 (1969).
5. Smakula P.H., Clapay P.C. *Trans. Met. Soc. AIME*, **239**, 421 (1967).