

УДК 535.5

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В.А. Пилипович, А.И. Конойко, А.М. Поликанин

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

## METHODS AND MEANS OF THE ELECTROOPTICAL MODULATION OF INFRARED SPECTRUM RADIATION

V.A. Pilipovich, A.I. Konojko, A.M. Polikanin

*B.I. Stepanov Institute of Physics NAS of Belarus, Minsk*

Рассматриваются методы и средства амплитудно-поляризационной модуляции плоско поляризованного излучения, которые можно осуществить за счет расщепления плоско поляризованного светового пучка на два, их фазовой модуляции и последующего суммирования.

**Ключевые слова:** электрооптический эффект, амплитудная модуляция, фазовая модуляция, поляризационный расщепитель, двулучепреломление, изотропный угол.

Means and methods of amplitude-polarization modulation of plane-polarized light are considered. These methods can be realized by means of the splitting plane-polarized light beam on two beams, their phase modulation and subsequent summation.

**Keywords:** electrooptical effect, amplitude modulation, phase modulation, polarization splitter, birefringence, isotropic angle.

### Введение

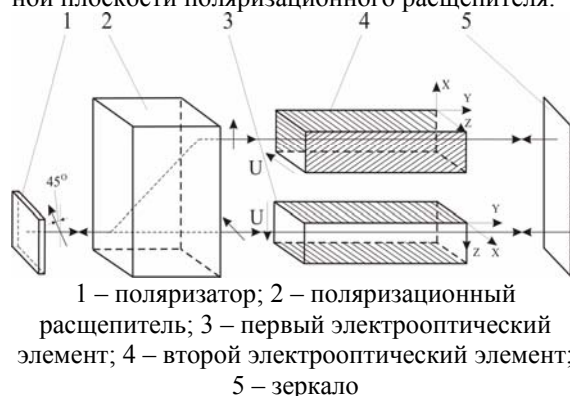
Общим недостатком электрооптических поляризационных модуляторов с поперечным приложением управляющего поля является тот факт, что вносимая им управляемая разность фаз между ортогональными составляющими электрического вектора проходящей световой волны наводится за счет управляемого смещения только одной из составляющих электрического вектора световой волны [1], [2]. Это приводит к невысокой эффективности их работы, т.к. величина управляющего напряжения в этом случае в два раза больше, нежели в случае, если бы осуществлялось управляемое смещение обоих составляющих электрического вектора световой волны. Поэтому представляет интерес рассмотреть метод поляризационной модуляции плоско поляризованного излучения, который бы исключил этот недостаток, что позволило уменьшить величину управляющего напряжения электрооптического модулятора с поперечным приложением управляющего поля в два раза и при этом минимизировать влияние температурной флуктуации физических параметров электрооптических кристаллов на светомодуляционные характеристики.

### 1 Низковольтные поляризационные электрооптические модуляторы с поперечным приложением управляющего поля

Сущность метода состоит в уменьшении величины управляющего напряжения электрооптического модулятора с поперечным приложением управляющего поля, которая достигается за счет фазовой модуляции обеих разнесенных в

пространстве ортогональных составляющих электрического вектора падающей на поляризационный расщепитель световой волны с их последующим суммированием.

Оптическая схема низковольтного электрооптического модулятора с поперечным приложением управляющего поля изображена на рисунке 1.1. При этом главная плоскость поляризационного расщепителя повернута на угол  $45^\circ$  относительно главной плоскости поляризатора, а активная ось оптической анизотропии второго электрооптического элемента повернута на угол  $45^\circ$  относительно главной плоскости поляризатора и на угол  $90^\circ$  относительно активной оси оптической анизотропии первого электрооптического элемента, которая перпендикулярна главной плоскости поляризационного расщепителя.



1 – поляризатор; 2 – поляризационный расщепитель; 3 – первый электрооптический элемент; 4 – второй электрооптический элемент; 5 – зеркало

Рисунок 1.1 – Оптическая схема низковольтного амплитудного модулятора излучения видимой и ближней ИК области спектра

Направление вектора напряженности управляющего электрического поля в первом электрооптическом элементе параллельно, а во втором электрооптическом элементе противоположно соответствующим кристаллографическим осям, кроме того, разность оптических путей, пройденных ортогонально поляризованными световыми пучками в одном направлении, должна быть кратна  $\lambda/4$ .

Электрооптический модулятор с поперечным приложением управляющего поля работает следующим образом. В исходном состоянии на вход электрооптического модулятора с поперечным приложением управляющего поля поступает неполяризованный световой пучок. Пройдя поляризатор, световой пучок становится плоско поляризованным, причем его плоскость поляризации ориентирована под углом  $45^\circ$  к вертикали (к плоскости рисунка). Данный плоско поляризованный пучок поступает на входную грань поляризационного расщепителя, в котором расщепляется на два ортогонально поляризованных световых пучка. Световой пучок (обыкновенный), поляризованный перпендикулярно главной плоскости поляризационного расщепителя, поступает на входную грань первого электрооптического элемента, а световой пучок (необыкновенный), поляризованный параллельно главной плоскости поляризационного расщепителя, – на входную грань второго электрооптического элемента. Оба названных световых пучка проходят через соответствующие электрооптические элементы, отражаются от зеркала и возвращаются в обратном направлении. При этом каждый из них при двойном прохождении через соответствующие электрооптические элементы испытывает одинаковую фазовую задержку  $\Gamma$ , определяемую выражением

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_0 l, \quad (1.1)$$

где  $n_0$  – показатель преломления электрооптического элемента в направлении активной оси оптической анизотропии,  $l$  – длина электрооптического элемента.

Это является следствием того, что электрооптические элементы имеют одинаковый линейный размер вдоль направления распространения света вследствие их совместного изготовления. При прохождении ортогонально поляризованных световых пучков через поляризационный расщепитель в обратном направлении они приобретают разность хода, кратную  $\lambda/2$ , что может быть достигнуто соответствующим подбором толщины поляризационного расщепителя, так как  $n_p \neq n_0$ , где  $n_p$  – фазовый показатель преломления необыкновенного светового пучка. Поэтому суперпозиция ортогонально поляризованных световых пучков дает результирующую выходную плоско поляризованную световую волну,

ориентированную перпендикулярно плоскости поляризации падающей на поляризационный расщепитель световой волны. В результате, в случае отсутствия на электрооптических элементах управляющего напряжения световой пучок не проходит поляризатор в обратном направлении.

Если на первый и второй электрооптические элементы подать управляющее напряжения величиной

$$U = \frac{1}{4} \frac{\lambda}{n_0^3 r_{63}} \frac{d}{l}, \quad (1.2)$$

что в два раза меньше, чем управляющее напряжение существующих лазерных затворов на базе поперечного электрооптического эффекта, то после прохождения ортогонально поляризованными световыми пучками соответствующих электрооптических элементов в обратном направлении они приобретут дополнительную оптическую разность хода, равную  $\lambda/2$ . Поэтому суперпозиция ортогонально поляризованных световых пучков на выходе поляризационного расщепителя даст результирующую выходную плоско поляризованную световую волну, ориентированную параллельно плоскости поляризации падающей на поляризационный расщепитель световой волны. В результате, в случае наличия на электрооптических элементах управляющего напряжения световой пучок проходит поляризатор в обратном направлении.

Аналогичная задача может быть решена, если между поляризационным расщепителем и первым электрооптическим элементом разместить вращатель плоскости поляризации в соответствии с рисунком 1.2, который будет вращать плоскость поляризации обыкновенного светового пучка на  $90^\circ$ . Таким вращателем может служить фазовая пластинка, вносящая оптическую разность хода, равную  $\lambda/2$ , оси анизотропии которой ориентированы к плоскости поляризации проходящего светового потока под углом  $45^\circ$ . При этом, чтобы получить амплитудную модуляцию на выходе, необходимо изменить ориентацию электрооптических элементов. Оси оптической анизотропии первого и второго электрооптических элементов должны быть параллельны главной плоскости поляризационного расщепителя. Направление вектора напряженности управляющего электрического поля в первом электрооптическом элементе параллельно, а во втором электрооптическом элементе противоположно соответствующим кристаллографическим осям. Это позволяет формировать данные электрооптические элементы на одном кристалле.

Общим недостатком вышеприведенных оптических схем низковольтного амплитудного модулятора излучения видимой и ближней ИК области является их низкая температурная стабильность. Так как вследствие флуктуации

температуры происходит изменение толщины поляризационного расщепителя ( $l$ ), что приводит к смещению рабочей точки модулятора на модуляционной характеристике. Это проиллюстрировано на осциллограмме, приведенной на рисунке 1.3 а). Осциллограмма светового сигнала на выходе модулятора, изображенная на рисунке 1.3 б), соответствует случаю отсутствия смещения рабочей точки модулятора.

Кроме того, такие модуляторы могут работать только в параллельных световых пучках. Это является следствием того, что в сходящихся световых пучках плоскости фокусировки обыкновенного и необыкновенного световых пучков не совпадают. Причиной этому является, во-первых, оптическая разность хода обыкновенного и необыкновенного световых пучков, во-вторых, разность дополнительных смещений  $\delta$ , возникающая вследствие прохождения обыкновенным и необыкновенным световыми пучками через плоско параллельный кристаллический элемент. Величина этого смещения может быть определена из выражения [3]:

$$\delta = \delta_0 - \delta_e = l_p \left( \frac{\cos \omega}{\sqrt{n_p^2 - \sin^2 \omega}} - \frac{\cos \omega}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \omega}} \right), \quad (1.3)$$

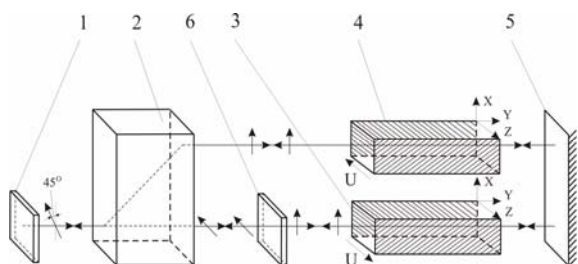
где  $\omega$  – половина угловой апертуры.

А оптическая разность хода обыкновенного и необыкновенного световых пучков в поляризационном расщепителе равна

$$\Delta' = (n_p - n_o)l, \quad (1.4)$$

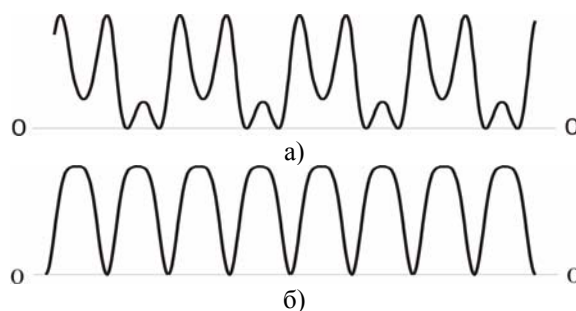
где 
$$n_p = \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}};$$

$n_e, n_o$  – фазовые показатели преломления, соответственно для необыкновенного и обыкновенного световых пучков;  $\theta$  – угол, образуемый нормалью к фронту световой волны с оптической осью поляризационного расщепителя.



1 – поляризатор; 2 – поляризационный расщепитель; 3 – первый электрооптический элемент; 4 – второй электрооптический элемент; 5 – зеркало; 6 – вращатель плоскости поляризации

Рисунок 1.2 – Оптическая схема низковольтного амплитудного модулятора излучения видимой и ближней ИК области спектра с параллельными электродами



а) – в случае наличия смещения рабочей точки, б) – в отсутствии смещения.

Рисунок 1.3 – Осциллограммы оптического отклика модуляторов, оптические схемы которых соответствуют схемам, изображенным на рисунках 1.1 и 1.2

Поэтому результирующее смещение плоскости фокусировки обыкновенного и необыкновенного световых пучков вдоль направления распространения ( $\Delta Z_\Sigma$ ) света будет равно их сумме, то есть [4], [5]

$$\Delta Z_\Sigma = \Delta' + \delta = \quad (1.5)$$

$$= l \left[ (n_p - n_o) + \cos \omega \left( \frac{1}{\sqrt{n_p^2 - \sin^2 \omega}} - \frac{1}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \omega}} \right) \right].$$

Это смещение приведет к резкому снижению эффективности светомодуляционных характеристик рассматриваемых электрооптических модуляторов.

Эти недостатки могут быть ликвидированы за счет использования в качестве поляризационного расщепителя двух двулучепреломляющих кристаллов, оптические оси которых ориентированы по отношению друг к другу под углом  $45^\circ$ . Тогда оптическая схема, изображенная на рисунке 1.1, трансформируется в оптическую схему, представленную на рисунке 1.4 а). Пунктирными линиями показаны плоскости, в которых лежат оптические оси кристаллов поляризационного расщепителя.

При необходимости базирования электрооптических элементов на одной плоскости в оптическую систему необходимо ввести вращатель плоскости поляризации, обеспечивающий поворот плоскости поляризации в прямом ходе на плюс  $45^\circ$ , а в обратном – на минус  $45^\circ$ . В этом случае оптическая схема низковольтного высокоэффективного амплитудного модулятора излучения примет вид, показанный на рисунке 1.4 б).

В вышеприведенных оптических схемах в качестве поляризационного расщепителя использовались плоскопараллельные кристаллические призмы, в которых оптическая ось ориентирована под углом к направлению распространения света. Использование таких расщепителей в непараллельных световых пучках требует, чтобы этот угол имел строго определенную величину

$\theta_i$ , которую можно определить из следующего выражения [6]:

$$\sin^2 \theta_i = -\frac{2n_e^4(n_o^2 + n_e^2) - n_o^4 n_e^2}{2(n_o^2 + n_e^2)(n_o^4 - n_e^4)} \pm \sqrt{\frac{n_e^4}{(n_o^4 - n_e^4)} + \left[ \frac{2n_e^4(n_o^2 + n_e^2) - n_o^4 n_e^2}{2(n_o^2 + n_e^2)(n_o^4 - n_e^4)} \right]^2} \quad (1.6)$$

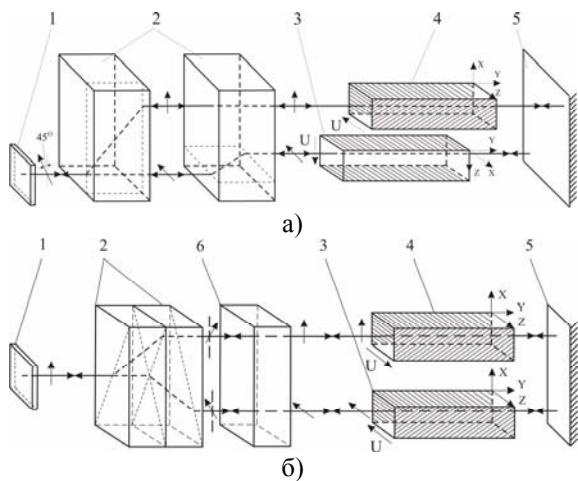
а, следовательно, угол расщепления  $\psi_i$  в этом случае можно найти из выражения

$$\psi_i = \arctg \left[ \frac{(n_o^4 - n_e^4) \sin \theta_i \cos \theta_i}{n_e^2 + (n_o^2 - n_e^2) \sin^2 \theta_i} \right] \quad (1.7)$$

Такие углы называются изотропными. Изотропные углы расщепления и среза некоторых кристаллов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Изотропные углы расщепления и среза некоторых кристаллов

Материал кристалла	$\psi_i$ (град.)	$\theta_i$ (град.)
NaNO <sub>3</sub>	9,17	49,34
CaCO <sub>3</sub>	5,90	51,27
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1,48	53,87



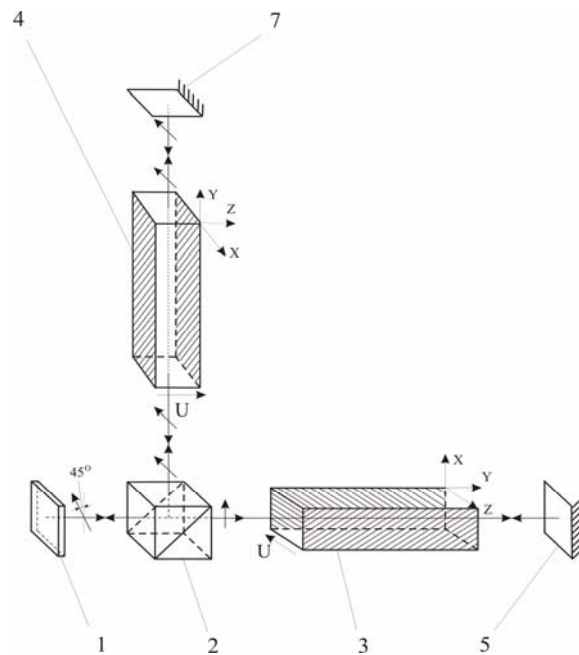
а) 1 – поляризатор; 2 – поляризационный расщепитель; 3 – первый электрооптический элемент; 4 – второй электрооптический элемент; 5 – зеркало

б) 1 – поляризатор; 2 – поляризационный расщепитель; 3 – первый электрооптический элемент; 4 – второй электрооптический элемент; 5 – зеркало; 6 – вращатель плоскости поляризации

Рисунок 1.4 – Оптическая схема низковольтного высокоэффективного амплитудного модулятора излучения видимой и ближней ИК области спектра

В качестве поляризационного расщепителя в модуляторе высокоэффективной модуляции

непараллельных световых пучков, работающего по описанному принципу, может быть использована призма Глана. Оптическая схема такого модулятора представлена на рисунке 1.5. Использование призмы Глана требует введения в оптическую схему второго зеркала. Основным требованием к такому затвору является равенство оптических путей в каналах модуляции, то есть минимизировать температурные градиенты. Это может быть обеспечено за счет базирования оптических элементов системы на общем основании из диэлектрического материала, обладающего высокой теплопроводностью и помещенного в металлический корпус.



1 – поляризатор; 2 – поляризационный расщепитель; 3 – первый электрооптический элемент; 4 – второй электрооптический элемент; 5 – первое зеркало; 7 – второе зеркало.

Рисунок 1.5 – Оптическая схема низковольтного высокоэффективного амплитудного модулятора излучения видимой и ближней ИК области спектра с использованием призмы Глана

## 2 Метод электрооптической амплитудной модуляции на базе двухлучевой интерференции

Теперь представляет интерес рассмотреть случай использования в качестве расщепителя объемной голограммы, образованной двумя наложенными друг на друга голографическими решетками с параллельными штрихами. В этом случае в корне меняется принцип работы оптической схемы лазерного затвора, так как для обеспечения максимальной дифракционной эффективности расщепителя плоскость поляризации падающего излучения должна быть перпендикулярна штрихам обеих решеток. Поэтому в

результате объединения световых пучков мы будем иметь в наличии не поляризационную модуляцию, а амплитудную модуляцию, являющуюся следствием электрооптического изменения разности фаз объединяемых пучков. Фактически в данном случае имеет место двухлучевая интерференция фазово-модулированных световых пучков.

Увеличение эффективности модуляции такого лазерного электрооптического затвора при одновременном уменьшении величины его управляющего напряжения достигается за счет расщепления падающего на модулятор излучения, что позволяет, во-первых, осуществлять индивидуальную фазовую модуляцию разнесенных в пространстве равных по амплитуде световых пучков с последующим их суммированием; во-вторых, за счет компактного размещения всех оптических элементов модулятора в одной плоскости и помещения их в диэлектрический корпус, материал которого обладает высокой теплопроводностью, минимизировать влияние возникающих в электрооптических кристаллах температурных градиентов на модуляционные характеристики; в-третьих, подавать управляющее напряжение только в момент генерации лазерного излучения.

Оптическая схема низковольтного электрооптического модулятора с поперечным приложением управляющего поля на базе двухлучевой интерференции изображена на рисунке 2.1. При этом первый и второй электрооптические элементы повернуты относительно голографического расщепителя на углы, равные углам дифракции падающих на них дифрагировавших световых пучков (на углы Брэгга), разность оптических путей пройденных дифрагировавшими световыми пучками кратна  $\lambda/2$ , направление вектора напряженности управляющего электрического поля в первом электрооптическом элементе параллельно, а во втором – противоположно оптической оси.

Такой лазерный электрооптический затвор на базе двухлучевой интерференции работает следующим образом.

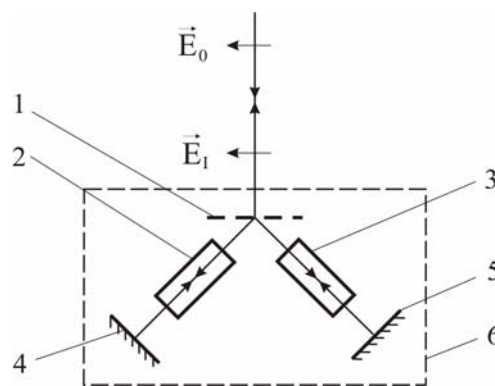
В исходном состоянии на голографический расщепитель поступает плоско поляризованный световой пучок, плоскость поляризации которого ориентирована в плоскости перпендикулярной оптической оси электрооптического кристалла. В результате дифракции исходного светового пучка на голографическом расщепителе в первом и втором электрооптических элементах в результате расщепления будут распространяться два равных по амплитуде и одинаково поляризованных световых пучка. Пройдя первый и второй электрооптические элементы, дифрагированные световые пучки отражаются от первого и второго отражателей и возвращаются в обратном направлении. При этом они приобретают оптическую

разность хода, равную  $\lambda/2$ . После прохождения голографического расщепителя в обратном направлении дифрагированные световые пучки объединяются и в результате интерференции гасят друг друга.

При подаче на первый и второй электрооптические элементы управляющего напряжения  $U$  величиной

$$U = \frac{1}{4} \frac{\lambda}{(n_0^3 r_{13} - n_e^3 r_{33}) l},$$

которая в два раза меньше, чем у существующих электрооптических лазерных затворов, световые пучки при возвращении к голографическому расщепителю приобретают оптическую разность хода, равную нулю. В результате прохождения голографического расщепителя они интерферируют, поэтому в направлении, противоположном исходному световому пучку, распространяется встречный световой пучок максимальной амплитуды.



- 1 – голографический расщепитель;
- 2 – первый электрооптический элемент;
- 3 – второй электрооптический элемент;
- 4 – первый отражатель; 5 – второй отражатель;
- 6 – диэлектрический корпус

Рисунок 2.1 – Оптическая схема низковольтного высокоэффективного амплитудного модулятора излучения видимой и ближней ИК области спектра с использованием двух лучевой интерференции

Расчеты показывают, что предлагаемые лазерные электрооптические затворы могут работать в световых пучках с угловой апертурой порядка  $\pm 4'$ . При этом, величина уменьшения светопропускания из-за влияния дифракционной эффективности голографического расщепителя составит не более 1%.

### Заключение

Предложен метод амплитудно-поляризационной модуляции плоско поляризованного излучения, который можно осуществить за счет расщепления плоско поляризованного светового пучка на два ортогонально поляризованных, их



фазовой модуляции и последующего суммирования. Предложен метод амплитудной модуляции плоско поляризованного излучения, который можно осуществить за счет расщепления светового пучка при помощи объемной голограммы, представляющей собой две брэгговские решетки с параллельными штрихами, на два поляризованных в одной плоскости, их фазовой модуляции и последующего их суммирования.

Научная новизна полученных результатов заключается: в разработке метода высокоэффективной модуляции оптического излучения на базе поперечного электрооптического эффекта, отличительной особенностью которого является высокая стабильность светомодуляционных характеристик, кроме того, он, в отличие от известных методов, позволяет снизить величину управляющего напряжения не менее чем в 2 раза, что имеет очень важное значение для модуляции добротности лазерных резонаторов, генерирующих излучение с длиной волны порядка 1,5 мкм. Практическая новизна полученных результатов заключается: в том, что на основе метода высокоэффективной модуляции оптического излучения могут быть созданы высокоэффективные лазерные затворы для видимой и ближней ИК области спектра, обладающие величиной управляющего напряжения вдвое меньшей, чем существующие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мустель, Е.П. Методы модуляции и сканирования света / Е.П. Мустель, В.Н. Парыгин. – М. : Наука, 1970. – 296 с.
2. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх, пер. с англ. С.Г. Кривошлыкова, Н.И. Петрова; под ред. И.Н. Сисакяна. – М. : Мир, 1987. – 616 с.
3. Дитчберн, Р. Физическая оптика / Р. Дитчберн, пер. с англ. Л.А. Вайнштейна, О.А. Шустина; под ред. И.А. Яковлева – М. : Наука, 1965. – 632 с.
4. Конойко, А.И. Цифровое управление положением плоскости фокусировки / А.И. Конойко, В.И. Поляков // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 1990. – № 2. – С. 57–60.
5. Конойко, А.И. Дискретное управление положением фокуса световых пучков / А.И. Конойко, В.И. Поляков, В.Ф. Ярмолицкий : сб. материалов XIII науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. ДАТЧИК – 2001», май 2001; под ред. проф. В.Н. Азарова. – М. : МГИЭМ, 2001. – С. 248–250.
6. *Convergent beam digital light deflector* / Kulcke, W. [et. al.] // *Optical and Electrooptical Information Processing*, ed. by J. T. Tippet et. al., Cambridge : MIT Press, 1965. – Ch. 23. – P. 371–418.

Поступила в редакцию 22.09.11.