

УДК 535.36 : 534.29

Л.Ф. Купченко¹, А.С. Рыбьяк¹, Е.Л. Черкашина²¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба²Харьковская национальная академия городского хозяйства

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ДВУХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКАХ ПРИ ПЕРВОМ И ВТОРОМ БРЭГГОВСКИХ РЕЗОНАНСАХ

В интересах повышения разрешающей способности акустооптических фильтров исследуется последовательная дифракция света на двух ультразвуковых пучках при первом и втором брэгговских резонансах. Разработана и исследована математическая модель системы. Произведен сравнительный анализ разрешающей способности акустооптических фильтров при различных параметрах акустооптического взаимодействия.

Ключевые слова: акустооптические фильтры, изображающая спектроскопия.

Введение

В настоящее время акустооптические фильтры находят самое широкое применение при решении задач селекции лазерного излучения, спектрального анализа и спектральной фильтрации оптического излучения. Обычно под спектральной фильтрацией оптического излучения понимают регистрацию изображений объектов в узких спектральных диапазонах. Это позволяет наблюдать в изображениях различные фрагменты, которые отличаются различной спектральной яркостью в каждом из спектральных диапазонов. Спектральная фильтрация оптического излучения составляет основу нового научного направления в оптоэлектронике – изображающей спектроскопии.

Устройства, в которых реализуются принципы изображающей спектроскопии, получили название – видеоспектрометров. В состав видеоспектрометров входят две системы. Во-первых, оптическая система, которая делит регистрируемую область пространства на набор смежных точек и, во-вторых, изображающий спектрометр, который разлагает состав принятого электромагнитного излучения на набор ограниченных спектральных полос. Появление видеоспектрометров связано с эволюционным развитием многоспектральных оптоэлектронных систем спектральной фильтрации, когда с появлением новых технологий удалось повысить число спектральных каналов сбора информации с 3–7 до 200–1000.

Исследования информационного содержания различных изображений показали, что если в многоспектральных снимках информация об объектах примерно равномерно распределена внутри рабочего спектрального диапазона, то в гиперспектральных изображениях наиболее ценная для интерпретации информация сосредоточена, как правило, в небольшом числе каналов [1]. Это связано с тем, что только в пределах достаточно узкого интервала длин волн (от сотых долей до единиц нанометров) проявляются существенные различия в отражающих и излучающих свойствах, в частности, Земной поверхности [2]. Поэтому исследование путей повышения разрешаю-

щей способности устройств спектральной фильтрации, является актуальной задачей.

Анализ известных диспергирующих устройств показал, что акустооптические фильтры обладают высокими динамическими свойствами и способны изменять свою аппаратную функцию в достаточно широких пределах, как по спектру, так и по величине коэффициента пропускания путем изменения условий акустооптического взаимодействия [3]. Однако их разрешающая способность существенно уступает дифракционным решеткам.

Известно, что в монохроматорах – спектральных приборах предназначенных для выделения участка спектра излучения в пределах заданного спектрального диапазона для увеличения дисперсии используется двойной монохроматор. Он представляет собой сочетание двух монохроматоров сопряженных, таким образом, чтобы излучение, пропущенное первым прибором, проходило через второй [4]. В работе [5] исследуются принципы построения двойного акустооптического фильтра, в котором оптическое излучение последовательно направляется на две ультразвуковые ячейки, а повышение разрешающей способности обеспечивается путем отстройки частоты ультразвука одной из ячеек от условий синхронизма таким образом, чтобы полосы спектральной селекции в каждой из ультразвуковых ячеек частично перекрывались.

Поэтому **целью настоящей статьи** является исследование селективных свойств последовательной дифракции света на двух ультразвуковых пучках при первом и втором брэгговских резонансах и оценка разрешающей способности таких оптоэлектронных систем.

Постановка задачи

В настоящей статье исследуется последовательная брэгговская дифракция светового излучения на двух ультразвуковых ячейках в интересах создания акустооптических фильтров с улучшенными спектральными характеристиками. Известно, что в результате дифракции немонахроматического излучения на ультразвуковой волне происходит разложение

его в пространственный спектр, причем каждая из пространственных компонент содержит определенные спектральные составляющие. Если в дальнейшем направить этот пучок на ультразвуковую волну, то при вторичной дифракции происходит пространственная селекция излучения, при которой с ультразвуковой волной взаимодействуют только те составляющие, для которых выполняются условия брэгговского синхронизма.

Угловое положение пространственных компонент связано с проекциями волнового вектора света $k_1 = k \cos \theta$ и $k_2 = k \sin \theta$ на оси координат и волновым вектором ультразвука k_0 соотношением [6]:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{k_2 + nk_0}{k_1}, \quad (1)$$

где ϕ – угол отклонения света при дифракции на ультразвуковой волне; n – номер дифракционного порядка.

Это означает, что угловая дисперсия, устанавливающая связь между приращением углового отклонения светового пучка на выходе ультразвуковой ячейки и изменением частоты ультразвука, либо длины ультразвуковой волны будет возрастать с увеличением номера используемой дифракционной компоненты.

Известно, что в периодических структурах, изменения коэффициента преломления, в том числе вызванных ультразвуковой волной, могут распространяться световые волны, лежащие в пределах ограниченных спектральных полос пропускания, что определяется числом полупериодов изменения коэффициентов преломления укладываемых на длине взаимодействия электромагнитной волны с периодической структурой. При неколлинеарном взаимодействии эти условия реализуются при угле Брэгга. Угол Брэгга, как известно, вычисляется из соотношения $\sin \theta_B = -k_0/2k$ (где k_0 и k – волновые числа ультразвука и света соответственно) при этом существенными оказываются дифракционные составляющие первого порядка [7].

В работах, выполненных при участии авторов [8,9], показано, что при взаимодействии световой и ультразвуковой волн под углами, кратными углу Брэгга $2\theta_B$, $3\theta_B$ и т.д. максимальной величины достигают дифракционные составляющие второго, третьего и последующих порядков. Как следует из выражения (1) угловая дисперсия пространственных компонент второго и последующих порядков выше, чем первых порядков. Поэтому можно ожидать, что селекционирующие свойства последовательной дифракции света на двух ультразвуковых пучках для второго брэгговского резонанса будет выше, чем для первого.

Геометрия последовательной дифракции света на двух ультразвуковых пучках

изображена на рис. 1, где показано, что световая волна со средним значением частоты – ω и волновым вектором – \vec{k} направляется под углом Брэгга θ_B либо под двойным углом Брэгга $2\theta_B$ на фронт звуковой волны. Если длина световой волны изменяется относительно среднего значения, то пространственная компонента, рассеянная ультразвуковой волной, изменяет свое угловое положение. Углы взаимодействия света со звуком, при которых реализуется брэгговский синхронизм θ_B или $2\theta_B$ отличаются от углов ϕ – отклонения света при дифракции на ультразвуковой волне. Поэтому при равенстве частот ультразвука в каждом из звуковых пучков следует развернуть вторую ячейку на угол α , который, как будет показано ниже, отличается по величине для первого и для второго брэгговских резонансов.

Метод решения и обоснование математической модели

Метод решения задачи о последовательной дифракции света на двух звуковых пучках предполагает вычисление амплитуды дифракционной составляющей и ее углового положения на выходе первого звукового пучка, а затем вычисление значения амплитуды на выходе второго звукового пучка в зависимости от длины световой волны. В процессе решения задачи определяются селективные свойства дифракционных составляющих первого и второго порядков на выходе первого и второго звуковых пучков.

При обосновании математической модели приняты следующие ограничения и допущения. Исследуются перестраиваемые акустооптические фильтры, при реализации которых, угол взаимодействия остается постоянным, а условия синхронизма при изменении длины световой волны в диапазоне $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ обеспечиваются путем изменения частоты ультразвука f_0 согласно условию $\lambda f_0 = \text{const}$. Предполагалось, что световая и звуковая волны плоские, причем полоса

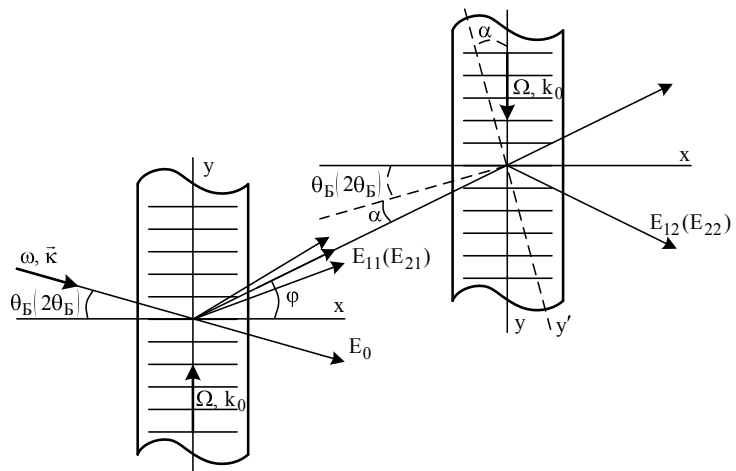


Рис. 1. Геометрия последовательной дифракции света на двух ультразвуковых пучках при первом и втором брэгговских резонансах

длин волн светового излучения шире аппаратной функции акустооптического фильтра.

Частота ультразвука в каждом из ультразвуковых пучков одинакова, а углы взаимодействия света с ультразвуковой волной равны и обеспечивают условия брэгговских резонансов первого или второго порядков. При использовании первого брэгговского резонанса световая волна направляется под углом Брэгга и используется первый либо минус первый порядок дифракции, а при использовании второго брэгговского резонанса взаимодействие осуществляется под двойным углом Брэгга и используются вторые порядки дифракции. Здесь при вычислении угла Брэгга значение волнового числа световой волны соответствует среднему значению световой волны λ_{cp} из исследуемого диапазона, и среднему значению частоты ультразвука f_{0cp} .

При построении математической модели, использовались аналитические выражения для главных дифракционных компонент при первом и втором брэгговских резонансах работы [8].

Для первого резонанса выражение имеет вид

$$E_1 = A \frac{2q}{\sqrt{\varepsilon_1^2 + 4q^2}} \cdot \sin \left(\frac{k_0^2 x \sqrt{\varepsilon_1^2 + 4q^2}}{4k_1} \right) \cdot \exp \left[i k_1 x + k_2 + k_0 y - \frac{i \varepsilon_1 k_0^2}{4k_1} x + i \frac{\pi}{2} \right], \quad (2)$$

а для второго резонанса:

$$E_2 = \frac{Aq^2}{\sqrt{\varepsilon_1^2 + q^4}} \cdot \sin \left(\frac{k_0^2 x \sqrt{\varepsilon_1^2 + q^4}}{2k_1} \right) \cdot \exp \left[i k_1 x + k_2 + k_0 y + i \left(\varepsilon_2 - \frac{2}{3} q^2 \right) \frac{k_0^2}{2k_1} x - i \frac{\pi}{2} \right], \quad (3)$$

где $\varepsilon_1 = 1 + 2k \sin \theta_B / k_0$; $\varepsilon_2 = 2 + k \sin 2\theta_B / k_0$ – относительная расстройка определяющая отличие условий взаимодействия от условий брэгговского синхронизма; $q = \Delta n / n_0 \cdot k / k_0^2$ – параметр Рытова; $\Delta n / n_0$ – относительное изменение коэффициента преломления среды вызванное ультразвуковой волной; A – амплитуда падающей световой волны.

На первом этапе решения задачи световое излучение, изменяющееся в диапазоне длин волн $\lambda_{min}, \lambda_{max}$, направлялось под углом Брэгга на фронт звуковой волны первого пучка и вычислялась амплитуда дифракционной составляющей первого порядка с использованием следующего выражения:

$$E_{m11} \lambda = A \frac{2q_1 \lambda}{\sqrt{\varepsilon_{11}^2 \lambda + 4q_1^2 \lambda}} \cdot \sin \left(k_0^2 l \sqrt{\varepsilon_{11}^2 \lambda + 4q_1^2 \lambda} / 4k \lambda \cos \theta_B \right), \quad (4)$$

$$\text{где } \varepsilon_{11} \lambda = 1 - \frac{2k \lambda \sin \theta_B}{k_0}; \quad q_1 \lambda = \left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)_1 \left(\frac{k \lambda}{k_0} \right)^2;$$

$\theta_B = \arcsin k_{0cp} / 2k_{cp}$ – угол Брэгга.

Угловое положение пространственной составляющей первого порядка на выходе звукового пучка в зависимости от длины волны изменяет свое пространственное положение в соответствии с выражением

$$\phi_1 \lambda = \arctg \frac{k \lambda \sin \theta_B - k_0}{k \lambda \cos \theta_B}.$$

Амплитуда дифракционной составляющей на выходе второго звукового пучка определялась с учетом вычисленного ранее значения амплитуды $E_{m11} \lambda$ и пространственного положения светового пучка $\phi_1 \lambda$

$$E_{m12} \lambda = E_{m11} \lambda \cdot A \frac{2q_1 \lambda}{\sqrt{\varepsilon_{12}^2 \lambda + 4q_1^2 \lambda}} \times \sin \left(\frac{k_0^2 l \sqrt{\varepsilon_{12}^2 \lambda + 4q_1^2 \lambda}}{4k \lambda \cos \phi_1 \lambda - \alpha_1} \right), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{12} \lambda = 1 - 2k \lambda \sin \phi_1 \lambda - \alpha_1 / k_0$; α_1 – угол, на который необходимо повернуть вторую акустооптическую ячейку для выполнения условий синхронизма при первом брэгговском резонансе.

На втором этапе решения задачи математическая модель включала исследование последовательной дифракции при втором брэгговском резонансе с использованием выражения (3). Амплитуда дифракционных составляющих второго порядка при взаимодействии света с ультразвуком под двойным углом Брэгга определялась из следующего соотношения:

$$E_{m21} \lambda = A \cdot q_2^2 \lambda / \sqrt{\varepsilon_{21}^2 \lambda + q_2^4 \lambda} \times \sin \left(k_0^2 l \sqrt{\varepsilon_{21}^2 \lambda + q_2^4 \lambda} / 2k \lambda \cos 2\theta_B \right), \quad (6)$$

$$\text{где } \varepsilon_{21} \lambda = 2 - \frac{2k \lambda \sin 2\theta_B}{k_0}; \quad q_2 \lambda = \left(\frac{\Delta n}{n_0} \right)_2 \left(\frac{k \lambda}{k_0} \right)^2.$$

При этом угловое положение пространственной составляющей второго порядка на выходе звукового пучка, зависящее от длины волны, определялось в соответствии с выражением

$$\phi_2 \lambda = \arctg \frac{k \lambda \sin 2\theta_B - 2k_0}{k \lambda \cos 2\theta_B}.$$

Затем вычислялась амплитуда дифракционной составляющей второго порядка на выходе следующего звукового пучка с учетом значения амплитуды $E_{m21} \lambda$ и пространственного положения светового пучка $\phi_2 \lambda$

$$E_{m22} \lambda = E_{m21} \lambda \cdot A \cdot q_2^4 \lambda / \sqrt{\varepsilon_{22}^2 \lambda + q_2^4 \lambda} \times \sin \left(k_0^2 l \sqrt{\varepsilon_{22}^2 \lambda + q_2^4 \lambda} / 2k \lambda \cos \phi_2 \lambda - \alpha_2 \right), \quad (7)$$

где $\varepsilon_{22} \lambda = 2 - 2k \lambda \sin \phi_2 \lambda - \alpha_2 / k_0$.

Результаты исследования математической модели

Математическая модель исследовалась при следующих условиях акустооптического взаимодействия. Среднее значение длины волны светового излучения $\lambda_{cp} = 0,55 \mu\text{м}$. В качестве среды взаимодействия использовался кристалл парателлуриата с коэффициентом преломления $n_0 = 2,26$ и скоростью распространения поперечной ультразвуковой волны равной $v = 617 \text{ м/с}$. Средняя частота ультразвука была выбрана равной $f_{0cp} = 100 \text{ МГц}$, а длина взаимодействия света с ультразвуковой волной составляла $l = 0,9 \text{ см}$.

Относительное изменение коэффициента преломления среды обеспечивающее максимальную величину дифракционной составляющей при первом брэгговском резонансе вычислялась из соотношения

$$\Delta n/n_0 \quad 1 = \pi/k_{cp} l \quad \text{и при выбранных параметрах акустооптического взаимодействия составляла}$$

$$\Delta n/n_0 \quad 1 = 1,556 \cdot 10^{-5},$$

При исследовании последовательной дифракции при втором резонансе относительное изменение коэффициента преломления среды вычислялось с использованием соотношения

$$\Delta n/n_0 \quad 2 = \sqrt{\pi k_0^2/k_{cp}^2} l \quad \text{и при тех же параметрах акустооптического взаимодействия составляла}$$

$$\Delta n/n_0 \quad 2 = 1,791 \cdot 10^{-4}.$$

Чтобы обеспечить условия брэгговского резонанса при последовательной дифракции вторая ультразвуковая ячейка должна быть повернута на угол, который вычисляется для первого резонанса из соотношения

$$\alpha_1 = \arcsin k_{0cp} \cos \phi_{1cp} / k_{cp},$$

где $\phi_{1cp} = \arctg \left(\frac{k_{cp} \sin \theta_B - k_{0cp}}{k_{cp} \cos \theta_B} \right)$, а при использовании второго брэгговского резонанса вторая ультразвуковая ячейка должна быть повернута относительно первой ячейки на угол равный

$$\alpha_2 = \arcsin 2k_{0cp} \cos \phi_{2cp} / k_{cp},$$

где $\phi_{2cp} = \arctg \left(\frac{k_{cp} \sin 2\theta_B - 2k_{0cp}}{k_{cp} \cos 2\theta_B} \right)$.

Селективные свойства последовательной дифракции света на двух ультразвуковых пучках определим построив графики зависимости дифракционной эффективности от длины волны световой волны при фиксированном значении частоты ультразвука (рис. 2) и графики зависимости разрешающей способности от длины волны световой волны при изменении частоты ультразвука в широком диапазоне, рис. 3.

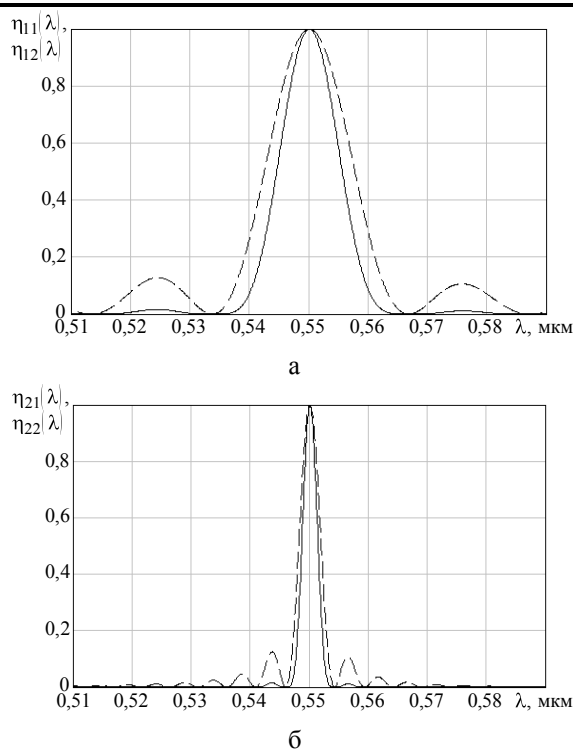


Рис. 2. Зависимости дифракционной эффективности от длины светового излучения на выходе первой (пунктирная линия) и второй (сплошная линия) акустооптических ячеек для первого брэгговского резонанса (а) и для второго (б)

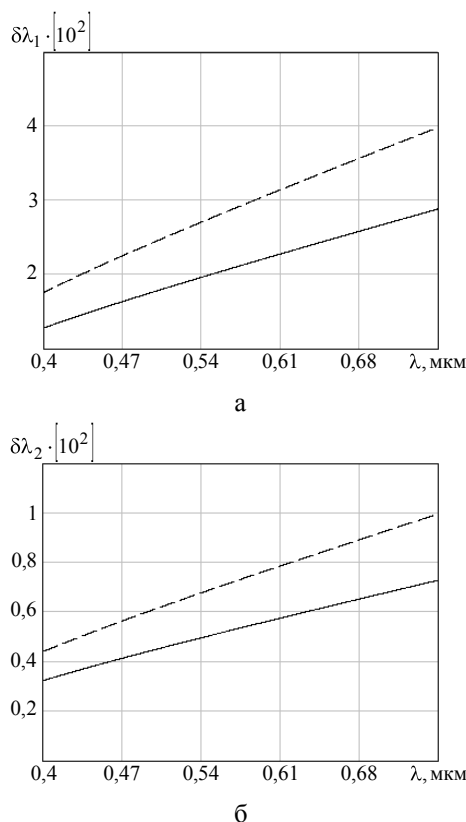


Рис. 3. Зависимости разрешающей способности от длины волны света на выходе первой (сплошная линия) и второй (пунктирная линия) акустооптических ячеек для первого (а) и второго (б) брэгговского резонанса.

В этом случае дифракционную эффективность определим как отношение квадратов амплитуд пространственных составляющих к амплитуде падающего излучения $\eta_i = |E_i/A|^2$ (где $i = 1, 2, \dots$ – порядок дифракции), а разрешающую способность как отношение полосы пропускания $\Delta\lambda$ (на уровне половины максимального значения дифракционной эффективности) к среднему значению длины волны λ_0 , при котором реализуется максимум дифракционной эффективности.

На рис. 2, а изображена зависимость дифракционной эффективности от длины светового излучения на выходе первой $\eta_{11}(\lambda)$ (пунктирная линия) и второй $\eta_{12}(\lambda)$ (сплошная линия) акустооптических ячеек для первого брэгговского резонанса, а на рис. 2, б – зависимость дифракционной эффективности для второго резонанса на выходе первой $\eta_{21}(\lambda)$ и второй $\eta_{22}(\lambda)$ акустооптических ячеек. Графики построены для длины волны светового излучения $\lambda_{\text{ср}} = 0,55$ мкм и частоты ультразвука $f_{\text{ср}} = 100$ МГц. При этих условиях взаимодействия использование последовательной дифракции позволяет повысить разрешающую способность примерно в полтора раза, как для первого так и для второго резонансов. Сравнительная оценка разрешающей способности акустооптического фильтра использующего первый брэгговский резонанс при дифракции на одном ультразвуковом пучке и фильтра на двойном резонанс с дифракцией на двух пучках показал, что разрешающая способность во втором случае выше примерно в пять раз.

Зависимости разрешающей способности от длины волны света на выходе первой и второй акустооптических ячеек для первого (а) и второго (б) брэгговского резонанса представлены на рис. 3. Графики отображают свойства перестраиваемых акустооптических фильтров на основе последовательной дифракции света на двух ультразвуковых пучках, когда условия синхронизма при изменении длины световой волны обеспечиваются путем изменения частоты ультразвука f_0 исходя из равенства $\lambda f_0 = \text{const.}$

Выводы

Показано, что селективность акустооптических фильтров использующих последовательную брэгговскую дифракцию света на двух ультразвуковых пучках возрастает. Это обусловлено тем, что при рассеянии светового излучения на ультразвуковой волне происходит разложение его в пространственный спектр. В процессе вторичной дифракции происходит пространственная селекция излучения, при

которой с ультразвуковой волной взаимодействуют только те спектральные составляющие, для которых выполняются условия брэгговского синхронизма.

С использованием математической модели исследованы селективные свойства акустооптических фильтров на основе последовательной дифракции света на двух ультразвуковых пучках при первом и втором брэгговских резонансах.

Установлено, что разрешающая способность акустооптического фильтра использующего второй брэгговский резонанс с дифракцией на двух ультразвуковых пучках, примерно в пять раз выше селективности устройств использующих первый брэгговский резонанс при дифракции на одном ультразвуковом пучке.

Список литературы

1. Попов М.А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли / М.А. Попов, С.А. Станкевич. – М.: Радиотехника, 2002. – 322 с.
2. Ключников В.Ю. Использование гиперспектральных технологий дистанционного зондирования для оценки экологического состояния природных комплексов / В.Ю. Ключников // Двойные технологии. – 2001. – № 3. – С. 13-19.
3. Ультразвук: маленькая энциклопедия // Под ред. И.П. Голямина. – М.: Сов. энциклопедия, 1978. – 400 с.
4. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. – 3-е изд. / В.В. Лебедева. – М.: Изд-во МГУ, 1984 – 352 с.
5. Spectral resolution enhancement of acousto-optic tunable filter by double-filtering / Chunguang Zhang, Zhonghua Zhang, Hao Wang, Yu Yang // OPTICS EXPRESS. – Vol. 16, No. 14. – P. 10234-10239.
6. Акустооптическая фильтрация с использованием дифракции света на ультразвуковой волне под углами, кратными углу Брэгга. Теория и эксперимент / Л.Ф. Купченко, А.Г. Коробка, Е.Л. Черкашина, А.В. Игнатъев // Электромагнитные волны и электронные системы: Межд. научно-технический журнал. – М.: Радиотехника, 2006. – Т. 11, № 2–3. – С. 109–126.
7. Корпел А. Акустооптика: Пер. с англ. / А. Корпел. – М.: Мир, 1993. – 240 с.
8. Зильберман Г.Е., Сидоров И.Н., Купченко Л.Ф. К теории дифракции света на ультразвуке // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 2. – С. 241–247.
9. Дифракционная эффективность второго порядка брэгговской дифракции при взаимодействии света с ультразвуком под двойным углом Брэгга / Л.Ф. Купченко, Ю.М. Плахов, О.В. Ефимова и др. // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 4. – С. 342-348.

Поступила в редколлегию 22.07.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПОСЛІДОВНА ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА НА ДВОХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПУЧКАХ ПРИ ПЕРШОМУ І ДРУГОМУ БРЕГІВСЬКИХ РЕЗОНАНСАХ

Л.Ф. Купченко, А.С. Рибьяк, О.Л. Черкашина

З метою підвищення роздільної здатності акустооптичних фільтрів досліджується послідовна дифракція світла на двох ультразвукових пучках при першому і другому брегівських резонансах. Розроблена і досліджена математична модель системи. Проведений порівняльний аналіз роздільної здатності акустооптичних фільтрів при різних параметрах акустооптичної взаємодії.

Ключові слова: акустооптичні фільтри, зображаюча спектроскопія.

**SUCCESSIVE DIFFRACTION OF LIGHT ON TWO ULTRASONIC BUNCHES
AT THE FIRST AND SECOND BRAGG RESONANCES**

L.F. Kupchenko, A.S. Ryb'yak, E.L. Cherkashina

In behalf of increase of discriminability of acousto-optical filters successive diffraction of light is probed on two ultrasonic bunches at the first and second брэгговских resonances. Developed and investigational mathematical model of the system. The comparative analysis of discriminability of acousto-optical filters is made at the different parameters of acousto-optical co-operation.

Keywords: *acousto-optical filters, depicting spectroscopy.*