

Выбор условий акустооптического взаимодействия для процессоров, использующих составляющие второго порядка брэгговской дифракции

Л. Ф. Купченко, Ю. М. Плахов, О. В. Ефимова, В. Б. Лобырев,
Е. Л. Черкашина, А. В. Шевченко

*Харьковский военный университет,
Украина, 61043, г. Харьков, пл. Свободы, 6*

Статья поступила в редакцию 18 октября 2001 г.

Изучены селективные свойства промежуточного режима дифракции вблизи брэгговского резонанса. Показано, что с уменьшением частоты ультразвука происходит расширение относительной полосы частот, в пределах которой выполняются условия брэгговского синхронизма. Установлено, что в промежуточном режиме, когда одновременно присутствуют составляющие первого и второго порядков дифракции, существует такой режим акустооптического взаимодействия, при котором величина дифракционной эффективности составляющей первого порядка минимальна. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эти положения.

Вивчено селективні властивості проміжного режиму дифракції поблизу бреггівського резонансу. Показано, що зі зменшенням частоти ультразвуку відбувається розширення відносної смуги частот, в межах якої виконуються умови бреггівського синхронізму. Встановлено, що в проміжному режимі, коли водночас присутні складові першого та другого порядків дифракції, існує такий режим акустооптичної взаємодії, при якому величина дифракційної ефективності складової першого порядку мінімальна. Наводяться результати експериментальних досліджень, які підтверджують ці положення.

Введение

Настоящая статья является продолжением работы [1], в которой авторами исследованы свойства составляющих второго порядка брэгговской дифракции при взаимодействии света с ультразвуковой волной под двойным углом Брэгга. Поскольку дифракционные составляющие второго порядка обладают в два раза большей угловой дисперсией по сравнению с составляющей первого порядка, можно ожидать, что в результате их использования удастся повысить в два раза разрешающую способность акустооптических процессоров, применяемых в космической спектроскопии.

Однако помимо большей угловой дисперсии дифракционные компоненты высших порядков обладают более высокой спектральной селективностью, что приводит к сужению полосы анализируемых частот.

Поэтому целью настоящей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование свойств акустооптического взаимодействия при условии, когда угол падения света на ультразвуковую волну равен удвоенному углу Брэгга (второй брэгговский резонанс). Кроме того, авторами разработаны предложения по выбору условий взаимодействия световой и ультразвуковой волн, при обеспечении которых акустооптические процессоры, использующие составляющие второго поряд-

ка брэгговской дифракции, будут обладать не только высокой разрешающей способностью, но и широкой полосой анализируемых частот.

Постановка задачи

Известно, что одним из методов расширения полосы анализируемых частот акустооптических спектроанализаторов, в которых взаимодействие световой и ультразвуковых волн происходит под углом Брэгга (первый брэгговский резонанс), является использование промежуточного режима. Обычно считают, что режим брэгговской дифракции проявляется, когда параметр Кляйна-Кука $Q > 4\pi$, а режим Рамана-Ната – при $Q \leq 0.3$ ($Q = k_0^2 l / k$, где k_0 и k – волновые числа звуковой и световой волн соответственно, l – длина взаимодействия). Переходная область, где $0.3 < Q < 4\pi$, – промежуточный режим. Этот режим характеризуется, во-первых, снижением селективности брэгговского синхронизма и может быть реализован, например, путем уменьшения частоты ультразвука. Во-вторых, в промежуточном режиме реализуется многоволновый режим, когда помимо основных пространственных компонент дифрагированных полей первого и нулевого порядков присутствуют составляющие и других порядков. В простейшем случае возникают три пространственных составляющих светового поля с амплитудами E_0 , E_1 и E_2 .

Промежуточным режимом дифракции света на ультразвуковой волне под двойным углом Брэгга будем считать трехволновый режим, когда основными дифракционными порядками являются нулевой и второй, а дополнительным – первый.

Однако нас будут интересовать такие условия взаимодействия световой и ультразвуковой волн в промежуточном режиме, при котором дифракционная эффективность второго порядка существенно больше дифракционной эффективности первого порядка. Обычно под дифракционной эффективностью i -го порядка понимают квадрат модуля отношения амплитуд дифрагировавшей и падающей световых волн $\eta_i^2 = |E_i / E_n|^2$, где $i = 1, 2, \dots$

В работе [1] показано, что дифракционная эффективность второго порядка зависит не только от относительного изменения коэффициента преломления $\Delta n/n$, которое связано с наличием в среде ультразвуковой волны, но и от частоты ультразвука f_0 . Это позволяет определить такие условия взаимодействия световой и ультразвуковой волн (значения параметров $\Delta n/n$ и f_0), при которых $\eta_2^2 \gg \eta_1^2$.

Таким образом в интересах повышения разрешающей способности акустооптических процессоров, необходимо, во-первых, обеспечить взаимодействие световой и ультразвуковой волн под двойным углом Брэгга для получения большей угловой дисперсии. Во-вторых, использовать промежуточный режим дифракции с тем, чтобы, уменьшая селективность акустооптического взаимодействия, расширить полосу анализируемых частот. В-третьих, найти такие условия взаимодействия волн, при которых амплитуда дифракционной составляющей светового поля первого порядка E_1 была бы существенно меньше амплитуды составляющей второго порядка E_2 .

Условия максимальной дифракционной эффективности второго порядка

В промежуточном режиме дифракции реализуется многоволновый режим, и получить простые аналитические выражения для амплитуд пространственных компонент светового поля нельзя. Чтобы исследовать характер поведения дифракционной эффективности первого $\eta_1^2(\Delta n/n, f_0) = |E_1(\Delta n/n, f_0) / E_n|^2$ и второго $\eta_2^2(\Delta n/n, f_0) = |E_2(\Delta n/n, f_0) / E_n|^2$ порядков была использована изложенная в работе [1] методика численного расчета составляющих поля, которая позволяет получить достоверный результат при многоволновом характере дифракции света на ультразвуковой волне. Эта методика основана на методе непрерывных дробей [2], предусматривающем сведение системы дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений с даль-

нейшим нахождением разрешенных направлений распространения и комплексных амплитуд световых волн в среде с периодической неоднородностью коэффициента преломления. Для качественной оценки поведения дифракционных составляющих в расчетах учитывались лишь три пространственные компоненты светового поля E_0 , E_1 и E_2 . В результате получены зависимости дифракционной эффективности первого η_1^2 и второго η_2^2 порядков от изменения параметров взаимодействия, представленные на рис. 1.

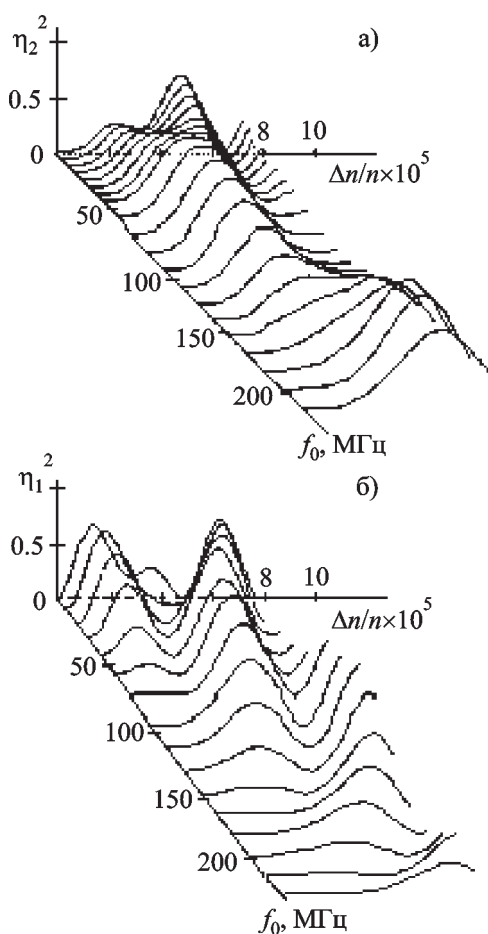


Рис. 1. Качественные зависимости дифракционных эффективностей второго порядка η_2^2 (а) и первого порядка η_1^2 (б) от относительного изменения показателя преломления $\Delta n/n$ и частоты ультразвука f_0 при взаимодействии световой и звуковой волн под двойным углом Брэгга

Из сравнения графиков можно сделать следующие выводы. Во-первых, характер поведения дифракционных эффективностей второго порядка (рис. 1, а) и первого порядка (рис. 1, б) при изменении $\Delta n/n$ и f_0 существенно отличается. Зависимость $\eta_2^2(\Delta n/n, f_0)$ имеет один “гребень”, а зависимость $\eta_1^2(\Delta n/n, f_0)$ несколько “гребней”, высота и положение которых изменяются при варьировании параметров взаимодействия. Во-вторых, ввиду различия поведения η_1^2 и η_2^2 , существуют области, в которых дифракционная эффективность второго порядка существенно больше величины дифракционной эффективности первого, т. е. “гребень” зависимости $\eta_2^2(\Delta n/n, f_0)$ совпадает с “ложбинами” зависимости $\eta_1^2(\Delta n/n, f_0)$.

Численные значения параметров взаимодействия $\Delta n/n$ и f_0 , при которых выполняется условие $\eta_2^2 \gg \eta_1^2$, можно найти из аналитических выражений для дифракционных эффективностей первого и второго порядка при точном соблюдении условий брэгговского синхронизма. А именно для взаимодействия звуковой и световой волн при двойном угле Брэгга $\sin \theta = -k_0/k$ (θ – угол между направлением распространения плоской световой волны и акустическим волновым фронтом). При этом дифракционная эффективность второго порядка определяется следующим выражением [3]:

$$|\eta_2|^2 = \frac{1}{1+\gamma^2} \sin^2 \left[\left(\frac{\Delta n}{n} \right)^2 \frac{kl}{2} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2 \sqrt{1+\gamma^2} \right], \quad (1)$$

где $\gamma^2 = \frac{\epsilon^2}{q^4}$, $\epsilon = 2 \left(1 + \frac{k \sin \theta}{k_0} \right)$, $q = \frac{\Delta n}{n} \left(\frac{k}{k_0} \right)^2$.

Максимальное значение дифракционной эффективности второго порядка $|\eta_2|_{\max}^2$ получим из (1) при равенстве нулю относительной расстройки $\epsilon = 0$ ($\sin \theta = -k_0/k$) и при синусе, равном единице. Тогда значение волнового числа звуковой волны, при котором обеспечивается условие

$|\eta_2|^2 = |\eta_2|_{\max}^2$, может быть найдено по формуле:

$$k_{02\max} = \frac{\Delta n}{n} k \sqrt{\frac{kl}{\pi}}. \quad (2)$$

Для амплитуды дифракционной составляющей световой волны первого порядка в предположении, что взаимодействие осуществляется под двойным углом Брэгга и выполняются условия полного брэгговского синхронизма, имеет место следующее выражение [4]:

$$E_1 = \frac{2q}{\sqrt{8q^2 + 1}} \sin\left(\frac{k_0^2 l}{4k} \sqrt{8q^2 + 1}\right). \quad (3)$$

Из (3) нетрудно определить волновые числа звуковой волны, при которых дифракционная эффективность первого порядка минимальна:

$$k_{01,m\min} = \sqrt[4]{\frac{16\pi^2 k^2}{l^2} m^2 - 8\left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2} k^4, \quad (4)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$

Из выражений (2) и (4) определяются значения $\Delta n/n$ и f_0 , при которых одновременно выполняются условия $|\eta_2|^2 = |\eta_2|_{\max}^2$ и $|\eta_1|^2 = |\eta_1|_{\min}^2$. Эти значения найдем графическим способом при следующих параметрах акустооптического взаимодействия: скорость распространения ультразвука $v_0 = 3630$ м/с, коэффициент преломления $n_0 = 1.73$, длина взаимодействия световой волны с ультразвуковой волной $l = 0.6$ см, длина волны светового излучения $\lambda_0 = 0.633$ мкм. На рис. 2 кривые 2, 3 и 4 соответствуют значениям минимума дифракционной эффективности первого порядка, а линия 1 соответствует значениям максимума дифракционной составляющей второго порядка.

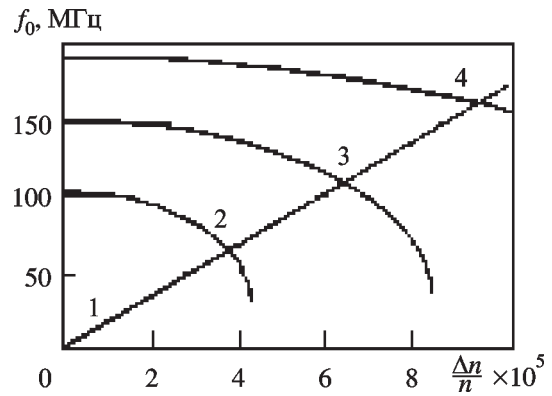


Рис. 2. Зависимости частоты ультразвука f_0 от относительного изменения показателя преломления $\Delta n/n$ при выполнении условий $|\eta_2|^2 = |\eta_2|_{\max}^2$ (линия 1) и $|\eta_1|^2 = |\eta_1|_{\min}^2$ (кривые 2, 3, 4)

Точки пересечения кривых 2, 3, 4 с линией 1 позволяют определить численные значения параметров взаимодействия $\Delta n/n$ и f_0 , при которых выполняется условие $\eta_2^2 \gg \eta_1^2$.

Из графиков следует, что в диапазоне изменений частоты ультразвука от 50 до 200 МГц и оптической плотности в пределах $\Delta n/n = 10^{-5} \div 10^{-4}$ существуют три набора параметров взаимодействия, при которых $\eta_2^2 \gg \eta_1^2$:

- 1) $f_0 = 70$ МГц и $\Delta n/n = 3.8 \cdot 10^{-5}$,
- 2) $f_0 = 120$ МГц и $\Delta n/n = 6.5 \cdot 10^{-5}$, (5)
- 3) $f_0 = 150$ МГц и $\Delta n/n = 9.4 \cdot 10^{-5}$.

Переходя к исследованию селективных свойств акустооптического взаимодействия в промежуточном режиме дифракции, изучим зависимость относительной полосы частот $\Delta f_0/f_0$, в пределах которой выполняется условие брэгговского синхронизма, от частоты ультразвуковых колебаний.

Полоса частот определялась из зависимостей дифракционной эффективности второго порядка с помощью метода непрерыв-

ных дробей, использованного ранее при построении графиков, представленных на рис. 1, а. В данном случае вычисления производились лишь для фиксированных значений параметров $\Delta n/n$ и f_0 (5), при которых $\eta_2^2 \gg \eta_1^2$.

Результаты вычислений представлены на рис. 3 кривой I. Существенно, что в промежуточном режиме при втором брэгговском резонансе (так же как и при первом) с уменьшением частоты ультразвука относительная полоса частот увеличивается, т. е. уменьшается селективность брэгговской дифракции.

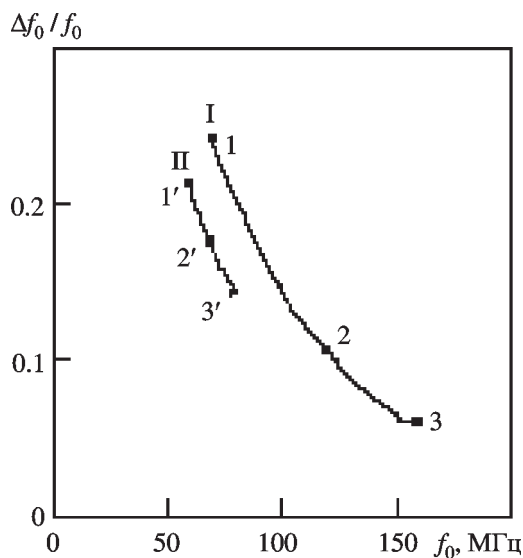


Рис. 3. Расчетные (кривая I) и экспериментальные (кривая II) зависимости относительной полосы частот ультразвука $\Delta f_0/f_0$ для дифракционных составляющих второго порядка от частоты ультразвуковых колебаний f_0 . Точкам 1, 2, 3 соответствуют расчетные значения $\Delta n/n = 3.8 \cdot 10^{-5}$, $6.5 \cdot 10^{-5}$, $9.4 \cdot 10^{-5}$ соответственно; точкам 1', 2', 3' — экспериментальные значения $\Delta n/n = 3.6 \cdot 10^{-5}$, $3.8 \cdot 10^{-5}$, $4 \cdot 10^{-5}$ соответственно

Экспериментальные результаты

Экспериментально проверены два теоретических положения настоящей работы. Во-первых, положение о том, что в пространстве

изменения параметров взаимодействия существуют такие значения частоты ультразвука и вызванного им относительного изменения оптической плотности среды, при которых дифракционная эффективность второго порядка существенно больше дифракционной эффективности первого. Во-вторых, о том, что в промежуточном режиме дифракции с уменьшением частоты ультразвуковых колебаний, когда взаимодействие световой и звуковых волн происходит под двойным углом Брэгга, возрастает относительная полоса частот ультразвука $\Delta f_0/f_0$.

В экспериментах использовался акустооптический модулятор МА-201 со следующими техническими характеристиками:

- материал звукопровода – стекло ТФ-7;
- преобразователь ультразвука – пьезопластина из ниобата лития, обеспечивающая продольные колебания с центральной частотой $f_0 = 80$ МГц;
- эффективность дифракции акустооптического модулятора – $30 \div 80 \% \cdot \text{Вт}^{-1}$;
- входное сопротивление – 50 Ом;
- входная электрическая мощность – не более 4 Вт.

Коэффициент электрооптической связи, характеризующий зависимость между величиной $\Delta n/n$ и напряжением на возбuditеле ультразвука U , определялся по методике, изложенной в работе [1], и для используемого модулятора $(\Delta n/n)U^{-1} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ В}^{-1}$.

При заданных значениях частоты ультразвука, определяемых характеристиками акустооптического модулятора для исследования свойств акустооптического взаимодействия под двойным углом Брэгга, потребовалось увеличить амплитуду высокочастотного напряжения, подаваемого на возбuditель ультразвука. Чтобы исключить его повреждение при подаче повышенной электрической мощности, все исследования проводились в импульсном режиме. В эксперименте длительность импульсов составляла 30 мкс, а частота их следования была равной 1 кГц.

Амплитудно-частотные характеристики акустооптического модулятора и его собственная центральная частота 80 МГц определили

возможности экспериментальной проверки сформулированных выше теоретических положений.

Результаты экспериментальной проверки первого из сформулированных положений представлены на рис. 4, где изображены амплитудно-частотные характеристики акустооптического взаимодействия для пространственных компонент первого и второго порядков дифракции вблизи расчетных значений параметров взаимодействия $f_0 = 70$ МГц, $\Delta n/n = 3.8 \cdot 10^{-5}$. Как видно из графиков, при этих значениях обеспечиваются минимум дифракционной эффективности первого порядка (кривая 1) и максимум второго порядка (кривая 2) при взаимодействии световой и ультразвуковой волн под двойным углом Брэгга.

Результаты экспериментального исследования селективных свойств акустооптического взаимодействия под двойным углом Брэгга, т. е. зависимость относительной полосы частот $\Delta f_0/f_0$ от частоты ультразвука f_0 , представлены на рис. 3 кривой II. Характер поведения расчетной и экспериментальной зависимостей совпадают. Однако измерение селек-

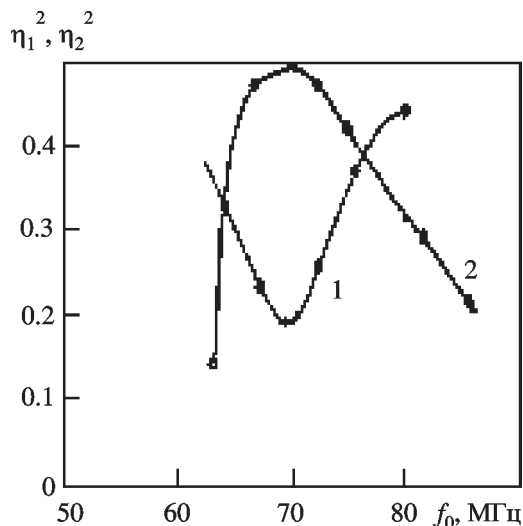


Рис. 4. Экспериментальные зависимости дифракционных эффективностей первого порядка (кривая 1) и второго порядка (кривая 2) от частоты ультразвука при $\Delta n/n = 3.8 \cdot 10^{-5}$

тивных свойств акустооптического взаимодействия в этом режиме удалось осуществить только в полосе частот акустооптического модулятора от 60 до 80 МГц.

Обсуждение

При обсуждении достоверности результатов обратим внимание на характер поведения полученных численным методом зависимостей дифракционных эффективностей первого и второго порядка от относительного изменения показателя преломления $\Delta n/n$ и частоты ультразвука f_0 (см. рис. 1) и графиков, полученных на основании аналитических выражений, характеризующих значения f_0 и $\Delta n/n$, при которых дифракционная составляющая первого порядка минимальна, а второго — максимальна, (см. рис. 2).

Сравнительный анализ показывает, что характер поведения кривых 2, 3, 4 (рис. 2) и “ложбин” зависимости $\eta_1^2(\Delta n/n, f_0)$ (рис. 1, б) совпадает. Совпадает также и характер поведения линии 1 (рис. 2) и “гребня” зависимости $\eta_2^2(\Delta n/n, f_0)$ (рис. 1, а). Это позволяет сделать вывод о том, что зависимости, полученные численным методом и с использованием аналитических выражений, идентичны.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальной проверки положения о существовании таких условий, при которых величина дифракционной эффективности первого порядка минимальна, а второго порядка максимальна. Как следует из рис. 2 (расчетные значения), условие $\eta_2^2 \gg \eta_1^2$ должно выполняться при $f_0 = 70$ МГц, $\Delta n/n = 3.8 \cdot 10^{-5}$. Результаты эксперимента, как видно из рис. 4, подтверждают расчетные значения. Действительно, при частоте ультразвука 70 МГц и напряжении, подаваемом на акустооптический модулятор ~ 16 В ($\Delta n/n \approx 3.8 \cdot 10^{-5}$) наблюдается минимум дифракционной составляющей первого и максимум составляющей второго порядка.

Сравнивая расчетные значения изменения относительной полосы частот $\Delta f_0/f_0$ (рис. 3, кривая I) и полученные в эксперименте

(рис. 3, кривая II), отметим, что некоторое уменьшение величины полосы акустооптического взаимодействия связано с влиянием на результаты эксперимента свойств амплитудно-частотных характеристик акустооптического модулятора.

Выводы

Исследование свойств акустооптического взаимодействия при выполнении условий второго брэгговского резонанса позволило разработать рекомендации по выбору параметров взаимодействия световой и звуковой волн для расширения полосы акустооптического взаимодействия и обеспечить при этом высокое значение дифракционной эффективности второго порядка.

Результаты и рекомендации состоят в следующем.

1. Установлено, что в промежуточном режиме дифракции вблизи второго брэгговского резонанса, также как в промежуточном режиме вблизи первого брэгговского резонанса, происходит расширение относительной полосы частот, в пределах которой выполняются условия брэгговского синхронизма. Поэтому для расширения полосы анализируемых частот следует использовать промежуточный режим дифракции, что можно обеспечить, например, путем уменьшения частоты ультразвука f_0 .

2. Установлено, что в промежуточном режиме взаимодействия вблизи второго брэгговского резонанса при некоторых значениях частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний существуют такие условия, при которых амплитуда дифракционной составляющей второго порядка максимальна, а первого – минимальна. Приведены аналитические выражения, позволяющие определить параметры взаимодействия, обеспечивающие этот режим.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Л. Ф. Черногору за постоянное внимание к работе.

Литература

1. Л. Ф. Купченко, Ю. М. Плахов, О. В. Ефимова, В. Б. Лобырев, Е. Л. Черкашина, А. В. Шевченко. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, **4**, №4, с. 342-348.
2. Г. Е. Зильберман, Л. Ф. Купченко. Радиотехника и электроника. 1977, **22**, №8, с. 1551-1556.
3. Г. Е. Зильберман, И. Н. Сидоров, Л. Ф. Купченко. Радиотехника и электроника. 1982, **27**, №2, с. 241-247.
4. L. F. Kupchenko, O. V. Efimova, Y. M. Plakhov, V. B. Lobyrev, E. L. Cherkashina. Proc. of 3rd International Conf. on Antenna Theory and Techniques, 1999, Sevastopol, Ukraine, pp. 129-130.

Choice of Conditions of Acoustooptic Interaction for Processors Using Components of Second Order Bragg's Diffraction

**L. F. Kupchenko, Y. M. Plakhov,
O. V. Efimova, V. B. Lobyrev,
E. L. Cherkashina, A. V. Shevchenko**

The selective properties of an intermediate diffraction regime near to Bragg's resonance are investigated. It is shown that upon reduction of ultrasound frequency the relative frequency band extends, the Bragg's synchronism conditions being fulfilled within the band. It is established that in an intermediate regime, when simultaneously the components of the first and second orders Bragg's diffraction are present, there occurs such regime of acoustooptic interaction, at which the diffraction's efficiency value of the component of the first order is minimal. The results of experimental research confirming these results are presented.