

01;05;07;08

Акустооптические ячейки с неодинаковой длиной взаимодействия в поперечном сечении светового луча

© В.Б. Волошинов, Г.А. Князев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия
e-mail: volosh@osc162.phys.msu.su

(Поступило в Редакцию 7 февраля 2003 г. В окончательной редакции 14 мая 2003 г.)

Исследованы закономерности дифракции света на акустических волнах, генерируемых в акустооптических ячейках пьезоэлектрическими преобразователями сложной конфигурации. В приближении плоских волн рассмотрена дифракция на акустических пучках, имеющих поперечное сечение в виде треугольника, ромба, шестигранника и т.д., когда длина взаимодействия света и звука не одинакова по сечению светового луча. Неодинаковость длины влияет на форму аппаратной функции акустооптических приборов и обеспечивает уменьшение интенсивности боковых лепестков их функции пропускания. Обсуждаются преимущества использования ячеек с преобразователями сложной конфигурации в перестраиваемых акустооптических фильтрах, работающих в волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов.

Введение

Акустооптическое взаимодействие в стеклах и кристаллах привлекает внимание исследователей как с точки зрения фундаментального знания, так и прикладной науки [1–5]. Однако особый интерес к дифракции света на ультразвуке обусловлен активным использованием акустооптического взаимодействия в науке и технике для управления световыми лучами. Акустооптические модуляторы, дефлекторы, фильтры и устройства оптической обработки информации активно применяются в оптике и спектроскопии, в лазерной физике и технике, а также в системах передачи и обработки данных [3–10].

Известно, что акустооптическая ячейка представляет собой образец из стекла или кристалла, в котором с помощью пьезоэлектрических преобразователей генерируются акустические волны [1,2]. В большинстве случаев преобразователи изготавливаются в виде прямоугольных пластин малой толщины. Область взаимодействия света и звука в ячейках определяется поперечными размерами акустического столба. Сечение звуковых пучков представляет собой прямоугольник с длиной l и шириной d , при этом длина и ширина ультразвукового столба практически совпадают с размерами управляющего электрода-преобразователя. Как правило, ширина столба d выбирается больше диаметра светового луча для получения максимальной эффективности дифракции по сечению светового пучка, а также для снижения влияния краевых эффектов и уменьшения расходимости ультразвука. Однако длина акустического столба l вдоль направления распространения света одинакова для всех парциальных световых лучей в пределах сечения светового пучка [1–3].

Угловая направленность акустической энергии для ячейки с равномерным распределением мощности ультразвука по апертуре преобразователя описывается функцией вида $z = \sin c^2 \xi$ [4–6]. Характерной особен-

ностью этой функции является существование основного максимума, а также симметрично расположенных и убывающих по интенсивности боковых лепестков. Направление на боковые максимумы излучения акустической энергии зависит от длины преобразователя l . Передаточная функция акустооптической ячейки, т.е. зависимость интенсивности дифрагированного света I_d от угла падения света θ , оптической длины волны λ или частоты ультразвука f , также имеет основной максимум и боковые максимумы [4,6–9].

При максимальной эффективности дифракции $I_d/I_i = 1.0$, где I_i — интенсивность падающего светового луча, энергия света, отклоняемого в боковые максимумы, может оказаться значительной. Например, при $I_d/I_i = 1.0$ интенсивность первых боковых максимумов с номерами ± 1 превышает 10%. Очевидно, что существование боковых лепестков передаточной функции является недостатком акустооптических приборов [7–10]. Например, в акустооптических фильтрах, предназначенных для селекции сигналов с различными длинами волн λ в волоконно-оптических линиях связи, присутствие боковых максимумов пропускания ухудшает спектральные характеристики системы фильтрации и повышает уровень перекрестных помех [10].

Управление формой аппаратной функции акустооптических ячеек

К настоящему времени известно несколько способов снижения интенсивности боковых лепестков аппаратной функции акустооптических ячеек [3–5]. Например, уровень боковых лепестков может быть значительно снижен при использовании секционированных преобразователей с аподизацией [4,5,7]. Для снижения уровня боковых лепестков можно также использовать пьезопреобразователи с неодинаковыми длинами секций [7]. Однако перечисленные методы управления формой функции

пропускания акустооптических ячеек представляются весьма сложными. Более простым способом управления аппаратной функцией является применение пьезоэлектрических преобразователей, имеющих сечение управляющих электродов в виде ромба, шестигранника, трапеции, эллипса и т.д. [8,9]. В данной работе уменьшение интенсивности боковых лепестков рассмотрено на примере ячеек акустооптических фильтров с неодинаковой длиной акустооптического взаимодействия по поперечному сечению светового луча [3–5]. Если длина акустооптического взаимодействия l не одинакова для парциальных компонент в падающем пучке света, то условия возникновения боковых лепестков для каждой из этих компонент также будут не одинаковыми. Поэтому в зависимости от длины меняется и положение боковых максимумов аппаратной функции акустооптической ячейки относительно центрального максимума. Таким образом, на выходе устройства будет наблюдаться изменение формы функции пропускания по сравнению с традиционным случаем прямоугольного электрода.

По сравнению с известными вариантами использования в акустооптических приборах преобразователей сложной формы [4,8,9] в настоящей работе исследуется случай, когда максимальная длина l и d ширина преобразователя фиксирована. При этом считается, что изменение формы управляющего электрода преобразователя ячейки происходит в пределах, ограниченных размерами прямоугольного преобразователя. На практике эти ограничения возникают, например, если длина пьезоэлектрической пластинки l лимитирована размером акустооптического кристалла, его оптической однородностью или поглощением света, а ширина ограничена апертурой светового луча a , т.е. $d \geq a$.

Интенсивность дифрагированного света

Известно, что в акустической ячейке с преобразователем прямоугольной формы, показанном на рис. 1, a , интенсивность дифрагированного света зависит от интенсивности падающего светового пучка по закону

$$I_d = I_i \frac{q^2}{q^2 + \eta^2} \cdot \sin^2 \left[\sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l}{2} \right], \quad (1)$$

где η — коэффициент расстройки; q — коэффициент акустооптической связи, зависящий от амплитуды упругой деформации и фотоупругих свойств среды взаимодействия, а также длины волны и брэгговского угла падения света, коэффициента акустооптического качества материала M_2 , акустической мощности P и сечения $S = ld$ акустического столба [1–4].

При выполнении условия фазового синхронизма коэффициент η тождественно равен нулю. Можно показать, что при синхронизме интенсивность дифракции равна

$$I_d = I_i \sin^2 \left[\frac{\pi l}{\lambda \cos \theta} \sqrt{\frac{M_2 P}{2S}} \right]. \quad (2)$$

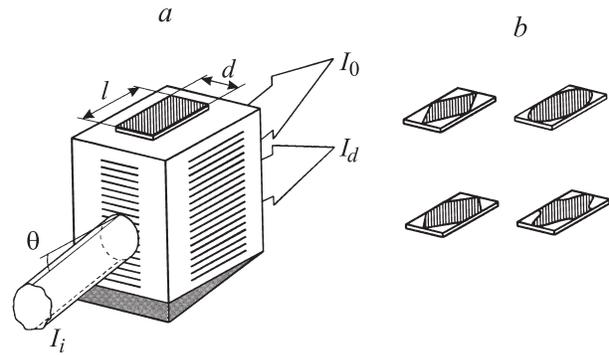


Рис. 1. Акустооптическая ячейка и пьезоэлектрические преобразователи с различной конфигурацией управляющих электродов: a — ячейка с преобразователем прямоугольной формы, b — возможные конфигурации управляющих электродов преобразователей.

Из выражений (1) и (2) видно, что при управляющей акустической мощности $P = P_0$, где $P_0 = 0.5S\lambda^2 \cos^2 \theta / M_2 l^2$, в ячейке реализуется режим дифракции с максимальной интенсивностью дифрагированного света. Произведение коэффициента акустооптической связи и длины взаимодействия в этом случае равно $ql = \pi$. Очевидно, что условие $ql = \pi$ является общим для всех парциальных компонент света в сечении оптического луча на рис. 1, a , так как длина взаимодействия для всех оптических компонент одинакова.

Расчет эффективности дифракции при неодинаковой длине взаимодействия

Иная картина дифракции наблюдается в том случае, когда пьезоэлектрический преобразователь генерирует в ячейке акустический столб, имеющий сечение, отличающееся от прямоугольного. На рис. 1, b показаны некоторые из возможных конфигураций управляющих электродов пьезоэлектрических преобразователей акустооптических ячеек. При анализе считается, что максимальные размеры управляющих электродов различных конфигураций ограничены размерами традиционного прямоугольного преобразователя, как показано на рисунке. В работе анализировались различные конфигурации электродов преобразователей, однако в данной работе расчет эффективности дифракции проводится только для пьезоэлектрических пластинок с формой управляющего электрода в виде треугольника, ромба или шестигранника. Тем не менее результаты проведенного исследования легко обобщаются и на случаи преобразователей более сложной формы, например, эллиптической и гауссовой.

Пьезоэлектрический преобразователь с электродом в виде ромба показан на рис. 2, a . Из рисунка видно, что длина взаимодействия света и звука зависит от координаты x , если световой пучок направить вдоль оси y .

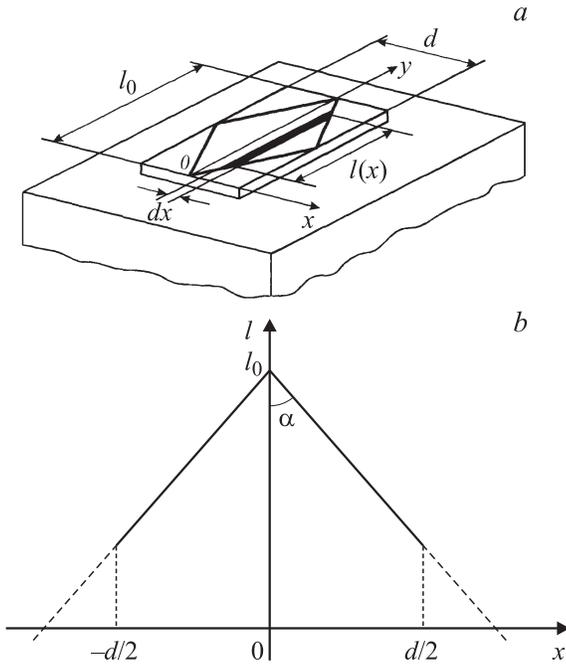


Рис. 2. Преобразователи с формой электродов в виде ромба и пятиугольника. *a* — оценка эффективной длины взаимодействия, *b* — конфигурация электрода преобразователя.

В том же случае, если управляющий электрод имеет форму треугольника (рис. 2, *b*), длина взаимодействия может быть представлена в виде $l(x) = l_0 - |x| \operatorname{ctg} \alpha$, где $|x| \leq 0.5d$. В приведенном соотношении угол α определяет форму управляющего электрода. Следует отметить, что полученное соотношение для длины также может быть применено для анализа работы преобразователей в форме трапеции, ромба, шестигранника и т.д. Этот вывод непосредственно следует из симметрии рассматриваемой задачи. Таким образом, интенсивность дифрагированного света для каждой оптической парциальной компоненты в пределах апертуры звукового столба с учетом соотношения (1) будет равна

$$I_d = I_i \frac{q^2}{q^2 + \eta^2} \sin^2 \left[\sqrt{q^2 + \eta^2} \frac{l_0 - |x| \operatorname{ctg} \alpha}{2} \right]. \quad (3)$$

Если при акустическом взаимодействии выполняется условие синхронизма, то с помощью соотношения (3) можно определить интенсивности дифракции для каждой из парциальных компонент в сечении светового луча. Результирующая эффективность дифракции на выходе ячейки \bar{I}_d определяется при сложении интенсивностей всех дифрагированных компонент в сечении светового луча с диаметром $a = d$

$$\bar{I}_d = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} I_d(x) dx = \frac{2}{d} \int_0^{d/2} I_i \sin^2 \left[\frac{q}{2} (l_0 - |x| \operatorname{ctg} \alpha) \right] dx. \quad (4)$$

Анализ соотношения (4) показывает, что в ячейке с неодинаковой длиной акустооптического взаимодействия принципиально невозможно получить максимальную эффективность дифракции $\bar{I}_d = 1.0$. Это связано с тем, что при фиксированном значении коэффициента связи q произведение $ql(x)$ равно π лишь при единственном значении координаты $|x| = (l_0 - \pi/q) \operatorname{tg} \alpha$. Для всех остальных значений x это произведение отлично от π . Поэтому происходит ослабление суммарной интенсивности дифрагированного света по сравнению с максимально возможной.

Проведенное исследование также подтверждает принципиальный вывод о том, что результирующая эффективность дифракции \bar{I}_d при заданной мощности ультразвука P зависит от формы управляющего электрода пьезоэлектрического преобразователя. Из соотношения (4) видно, что эффективность дифракции определяется углом α . На рис. 3 представлено семейство кривых зависимости суммарной интенсивности дифрагированного света от нормированной мощности ультразвука P/P_0 , рассчитанных при различных значениях угла α , где $\alpha_1 = 90^\circ$ (кривая 1) и $\alpha_2 = 75^\circ$, $\alpha_3 = 60^\circ$ и $\alpha_4 = 45^\circ$ (кривые 2–4). Из рисунка следует, что максимальное значение результирующей эффективности дифракции $\bar{I}_d = 1.0$ достижимо только в случае прямоугольного электрода. При уменьшении угла α происходит убывание величины максимального значения эффективности дифракции.

Данные, приведенные на рис. 3, доказывают, что в ячейках с преобразователями непрямоугольной формы максимальные значения \bar{I}_d реализуются при мощностях акустической волны P , превышающих значение мощности ультразвука $P = P_0$, характерное для звуковых волн, генерируемых прямоугольным преобразователем. Расчеты доказывают, что любое уменьшение угла α сопровождается ростом акустической мощности по сравнению с традиционным случаем. Так, из рис. 3 видно, что при $\alpha = \alpha_4$ (кривая 4) результирующая интенсивность оказывается меньше единицы $\bar{I}_d = 0.85$. Значение мощности управляющего сигнала при этом возрастает до $P = 1.6P_0$ по сравнению с известным случаем.

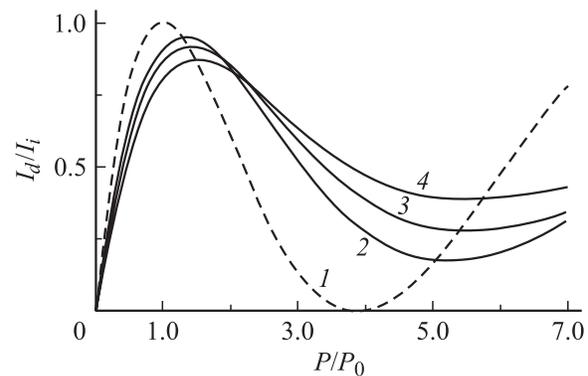


Рис. 3. Зависимость эффективности дифракции от нормированной акустической мощности.

Таким образом, применение ячеек с преобразователями непрямоугольной формы сопровождается некоторым уменьшением максимального значения эффективности дифракции и увеличением требований к величине управляющей акустической мощности.

В заключение необходимо отметить, что при расчете соотношения (5) пределы интегрирования можно изменить с учетом ограниченности диаметра светового луча по сравнению с шириной преобразователя. Тогда соотношение (5) справедливо и при анализе эффективности дифракции в случае преобразователя с формой электрода в виде пятиугольника, шестиугольника и т. д. Однако если управляющий электрод преобразователя имеет конфигурацию, описываемую эллиптической, гауссовой или другой зависимостью длины взаимодействия от координаты, то соответствующие замены в выражении (4) позволяют оценить параметры дифракции и в этих случаях.

Эффективность дифракции при нарушении условия синхронизма

Зависимость интенсивности дифрагированного света от угла падения света на ультразвук, его частоты или оптической длины волны определяет вид передаточной функции акустооптической ячейки. Форма передаточной функции и интенсивность боковых лепестков могут быть определены из анализа акустооптического взаимодействия при нарушении условия синхронизма. Расчет по формуле (3) дает следующее выражение для суммарной эффективности дифракции \bar{I}_d на выходе акустооптической ячейки

$$\bar{I}_d = I_i \frac{q^2}{2(q^2 + \eta^2)} \times \left\{ 1 - \frac{\sin(l_0 \sqrt{q^2 + \eta^2}) - \sin[(l_0 - d \operatorname{ctg} \alpha) \sqrt{q^2 + \eta^2}]}{d \operatorname{ctg} \alpha \sqrt{q^2 + \eta^2}} \right\}. \quad (5)$$

Результаты расчетов по формуле (5) для результирующей эффективности в зависимости от коэффициента синхронизма при нескольких значениях углов α представлена на рис. 4. Расчет проводился для максимальной длины взаимодействия $l_0 = 1.0$ см. На рис. 4 кривая 1 соответствует прямоугольному преобразователю с углом $\alpha_1 = 90^\circ$, в то время как кривые 2–4 — электродам с углами $\alpha_2 = 75^\circ$, $\alpha_3 = 60^\circ$ и $\alpha_4 = 45^\circ$. Расчеты проведены соответственно для мощностей $P_1 = P_0$, $P_2 = 1.3P_0$, $P_3 = 1.4P_0$ и $P_4 = 1.5P_0$. Видно, что при малых значениях угла α функция пропускания акустооптической ячейки становится однородной и практически не содержит пульсаций. При этом наблюдается наибольшее сглаживание интенсивности боковых лепестков и ликвидируется вероятность нежелательного пропускания сигнала из-за большой интенсивности одного из боковых максимумов аппаратной функции прибора.

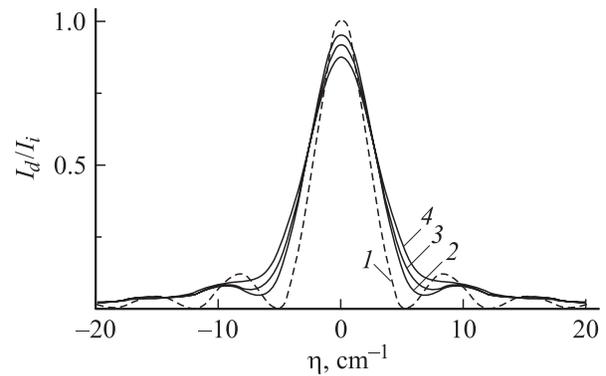


Рис. 4. Зависимость эффективности дифракции от коэффициента расстройки для преобразователей различных конфигураций.

Исследование показало, что одновременно со сглаживанием интенсивности боковых максимумов происходит увеличение ширины основного максимума функции пропускания ячейки [9]. Однако расчет показывает, что уширение основного максимума осуществляется не более чем в 1.5–2 раза по сравнению со случаем для прямоугольного преобразователя. Эта закономерность оказывается справедливой и для преобразователей, имеющих профиль электрода, описываемый гауссовой, синусоидальной или ступенчатой функцией.

Анализ данных на рис. 4 говорит о том, что изменение формы управляющего электрода пьезопреобразователя заметно уменьшает боковые лепестки передаточной функции ячеек. Интенсивность каждого из боковых максимумов при правильном выборе формы электрода может оказаться приблизительно в 2 раза меньше максимальной интенсивности боковых максимумов в случае прямоугольного преобразователя. Следует отметить, что еще более сильное подавление боковых лепестков достигается, например, если не вводить ограничений на максимальные габариты управляющего электрода преобразователя. Для этого при фиксированной длине пьезоэлектрической пластинки l_0 необходимо уменьшить ширину пьезоэлектрического преобразователя d или, наоборот, при заданной ширине d требует применять более протяженные пьезоэлектрические преобразователи [8,9].

Уменьшение уровня перекрестных помех на выходе фильтров

Одним из перспективных направлений в акустооптике является разработка перестраиваемых оптических фильтров для применений в интервале оптических длин волн $\Delta\lambda = 1532\text{--}1565$ нм в WDM-линиях волоконно-оптической связи со спектральным уплотнением каналов [10]. Спектральное разнесение соседних каналов $\delta\lambda$ и их общее число в волоконно-оптической линии связи $N = \Delta\lambda/\delta\lambda$ зависят от уровня перекрестных помех на выходе акустооптического устройства. Известно, что

уровень перекрестных помех в линии связи не должен превышать -20 dB, поэтому при $\eta = 0$ и настройке акустооптического фильтра на пропускание в одном из каналов с длиной волны монохроматического излучения $\lambda = \lambda_0$, его паразитное пропускание на длине волны $\lambda_1 = \lambda_0 \pm \delta\lambda$ должно быть меньше 1%, т.е. $I_d \leq 0.01$ [10].

Важным обстоятельством при работе акустооптического фильтра в WDM-линии связи является то, что спектр падающего на прибор оптического сигнала не является сплошным и все оптические сигналы в волокне являются монохроматическими. Поэтому уровень перекрестных помех на выходе фильтра напрямую не зависит от значения спектральной полосы пропускания прибора, а определяется конкретным значением функции пропускания на длине волны соседнего канала. Расчет, проведенный по формуле (1) для преобразователя прямоугольной формы с длиной электрода $l = 1.0$ см, показывает, что интенсивность дифракции $I_d \leq 0.01$ достигается при коэффициентах расстройки $|\eta| \geq 35$ см $^{-1}$. Если же в фильтре используется преобразователь с управляющим электродом в виде треугольника, ромба или шестигранника, то из формулы (6) следует, что фильтр с $l_0 = 1.0$ см имеет коэффициент пропускания менее 1% при расстройках $\eta \geq 20$ см $^{-1}$. Таким образом, при одном и том же уровне паразитного сигнала 1% коэффициент расстройки в фильтре с электродом сложной формы из-за отсутствия пульсаций спектральной характеристики оказывается приблизительно в два раза меньше, чем в устройстве с прямоугольным преобразователем.

Известно, что величина расстройки при акустооптическом взаимодействии пропорциональна разности длин волн света $\delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_1$ [3,4]. Поэтому меньшему значению расстройки соответствует меньшее спектральное разнесение двух соседних каналов $\delta\lambda$. Таким образом, использование в фильтрах преобразователей сложной конфигурации допускает меньшее спектральное разнесение оптических несущих, что увеличивает общее число сигналов N в волоконно-оптической линии связи. Поэтому характеристики акустооптических фильтров с преобразователями сложной формы оказываются предпочтительней, чем у фильтров с прямоугольными преобразователями.

Заключение

В работе исследованы акустооптические ячейки с пьезоэлектрическими преобразователями имеющими форму управляющих электродов, отличающуюся от прямоугольной. Применение преобразователей сложной конфигурации позволяет снизить уровень боковых лепестков функции пропускания акустооптических ячеек. Поэтому перекрестные помехи на выходе акустооптических фильтров, используемых в волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов, могут быть заметно снижены по сравнению с аналогичными

приборами, имеющими пьезоэлектрические преобразователи традиционной конфигурации.

Анализ показал, что улучшение характеристик приборов за счет использования преобразователей сложной формы сопровождается уширением полосы пропускания и снижением интенсивности дифрагированного света. Однако неизбежное ухудшение этих характеристик оказывается незначительным и оно не сказывается на параметрах фильтрации света в волоконно-оптической линии связи со спектральным уплотнением каналов. Поэтому исследованный метод улучшения характеристик акустооптических приборов может быть рекомендован для использования в волоконной оптике, так как привлекает внимание своей простотой и универсальностью.

Список литературы

- [1] Балакиши В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 279 с.
- [2] Korpel A. Acousto-Optics. New York: Marcel Dekker, 1988. 296 p.
- [3] Xu J., Stroud R. Acousto-Optic Devices. New York: Wiley, 1992. 498 p.
- [4] Goutzoulis A., Pape D. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices. New York: Marcel Dekker, 1994. 384 p.
- [5] Гудмен Дж. Введение в Ферье-оптику. М.: Мир, 1970. 295 с.
- [6] Chang I.C. // Proc. SPIE. 1976. Vol. 90. P. 12-22.
- [7] Парыгин В.Н., Вершубский А.В., Филатова Е.Ю. // ЖТФ. 2000. Т. 71. Вып. 9. С. 73–78.
- [8] Bademin L. // Optical Engineering. 1996. Vol. 25. P. 303–308.
- [9] Pape D., Wasilowski P., Krainak M. // Proc. SPIE. 1987. Vol. 789. P. 116–126.
- [10] Sapriel J., Charissoux D., Voloshinov V., Molchanov V. // J. Lightwave Technology. 2002. Vol. 20. N 5. P. 892–899.