

излучения с веществом. Тезисы докладов, Ленинград, 1988. с. 192-193.

[5] Биберман Л.М., Якубов В.С., Воробьев И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982, 375 с.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
20 марта 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 13 12 июля 1989 г.  
06. 3; 08

### ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛНОВОГО ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ

О.И. Белокурова, А.С. Шербаков

При создании и совершенствовании приборов оптической обработки информации все большее внимание уделяется использованию нелинейных волновых эффектов, которые лежат в основе солитонных и параметрических явлений [1, 2], оптической бистабильности [3]. С практической точки зрения несомненный интерес представляют также устройства оптической обработки с волновым гетеродинированием в среде с диспергирующими потерями. Точность спектрального  $\delta\lambda$  и частотного  $\delta f$  измерения параметров сигнала определяются неопределенностью в энергии или импульсе фотона, локализованного в области взаимодействия. При волновом гетеродинировании информация с высокочастотной волны переносится на волну разностной частоты, что увеличивает характерное время  $\tau$  и длину  $l$  распространения сигнала в среде и обеспечивает значительное повышение точности его обработки, поскольку  $\delta\lambda \sim 1/l$  и  $\delta f \sim 1/\tau$ . В данной работе сообщается об исследовании эффекта коллинеарного волнового гетеродинирования и экспериментах по его применению при оптическом анализе частотного спектра СВЧ-радиосигналов в реальном масштабе времени методами акустооптики.

В трехволновом приближении, считая воздействие волны накачки (гетеродина) с амплитудой  $a_N$  параметрической модуляцией как для сигнальной волны  $a_c$ , так и для волны разностной частоты  $a_p$ , в случае сонаправленного взаимодействия можно получить систему связанных линеаризованных укороченных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{da_c}{dx} + \alpha_c a_c &= \mp B_p a_p A_N e^{-\alpha_N x} \cos \varphi, \\ \frac{da_p}{dx} + \alpha_p a_p &= -B_c a_c A_N e^{-\alpha_N x} \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{dx} &= A_N e^{-\alpha_N x} \left[ B_c \frac{a_c}{a_p} \pm B_p \frac{a_p}{a_c} \right] \sin \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi_c \pm \varphi_p; \quad A_N = a_N(0),$$

где  $\varphi_i$ ,  $B_i$  и  $\alpha_i$  — фазы, коэффициенты связи и декременты затухания волн. Верхний знак в (1) соответствует случаю превышения частоты накачки  $\omega_H$  над частотой сигнала  $\omega_c$ , нижний — обратной ситуации. Из первого интеграла системы (1) с учетом характерного для волнового гетеродинамирования граничного условия  $a_p(0) = 0$  получаем  $\sin \varphi(x) = 0$ . Тогда система (1) имеет точное решение [4], выражающееся через цилиндрические функции  $Z_\gamma$ . Так для волны разностной частоты получаем:

$$a_p(x) = \frac{\pi A_H A_c B_c}{2 \alpha_H \sin(\pi \gamma)} e^{-\frac{\pi}{2}(\alpha_H + \alpha_c + \alpha_p)x} \left[ Z_{-\gamma}(\delta e^{-\alpha_H x}) Z_\gamma(\delta) - Z_\gamma(\delta e^{-\alpha_H x}) Z_{-\gamma}(\delta) \right] \quad (2)$$

где  $\gamma = \frac{\alpha_H + \alpha_c - \alpha_p}{2 \alpha_H}$ ;  $\delta = \frac{A_H}{\alpha_H} \sqrt{B_c B_p}$ ;  $Z_\gamma \equiv J_\gamma$  при  $\omega_p = \omega_c - \omega_H$ ;

$Z_\gamma \equiv I_\gamma$  при  $\omega_p = \omega_H - \omega_c$ .

Соотношение (2) описывает взаимное влияние сигнальной и результирующей волн в заданном поле затухающей накачки. Этот результат можно рассматривать как развитие известного подхода [5], приводящего к выражению для мощности волны разностной частоты через эффективную длину взаимодействия.

Представленной модели волнового гетеродинамирования в среде с диспергирующими потерями могут быть поставлены в соответствие процессы в акустооптическом модуляторе со звукопроводом, обладающим значительной упругой нелинейностью. В этом случае возможна реализация гетеродинамирования продольными упругими волнами, и решение системы (1) конкретизируется следующим образом:

$$\alpha_i = \eta \omega_i^2; \quad B_i = \frac{\Gamma \omega_i \omega_H}{4 \sigma^2}; \quad \delta = \frac{\Gamma}{\eta \omega_H} \sqrt{\frac{A_H(0) \sigma^2 (1 - \gamma^2)}{8 S \rho \sigma^5}}; \quad \gamma = \frac{\omega_c}{\omega_H},$$

где  $\sigma$ ,  $\eta$ ,  $\Gamma$  — скорость, диссипативный коэффициент и константа нелинейности продольных упругих волн. Соотношение для мощности упругой волны разностной частоты, выраженной в размерных переменных через мощности исходных волн  $P_c(0)$  и  $P_H(0)$ , имеет вид:

$$P_p(\gamma, x) = \frac{\Gamma^2 P_H(0) P_c(0)}{8 S \rho \sigma^2 \eta^2 \omega_H^2} (1 - \gamma^2)^2 \frac{x^2}{4 \sin^2(\pi \gamma)} e^{-2 \eta \omega_H^2 x (1 + \gamma^2 - \gamma^2)} \times \left[ Z_{-\gamma}(\delta e^{-\eta \omega_H^2 x}) Z_\gamma(\delta) - Z_\gamma(\delta e^{-\eta \omega_H^2 x}) Z_{-\gamma}(\delta) \right], \quad (3)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения области взаимодействия;  $\rho$  — плотность среды. На рис. 1 сплошными линиями представлены зависимости мощности волны разностной частоты  $P_p(\gamma, x)$ , построенные с помощью ЭВМ по формуле (3) для различных значений

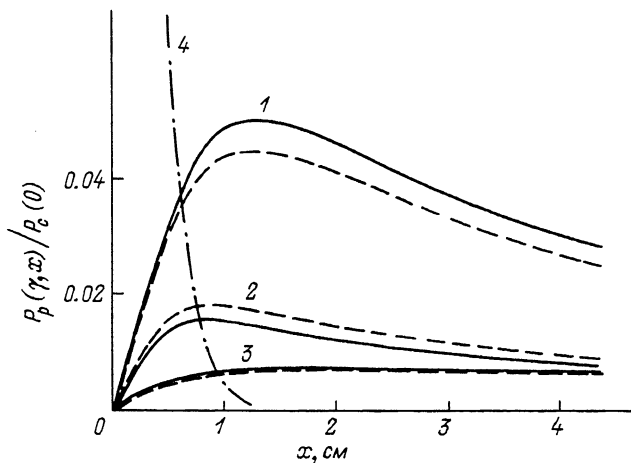


Рис. 1. Зависимость мощности волны разностной частоты от координаты вдоль оси  $[001]$  в  $PbMoO_4$ : 1 -  $\gamma=0.75$ , 2 -  $\gamma=1.25$ , 3 -  $\gamma=0.9$ , 4 - мощность сигнальной волны  $P_c(\gamma, x)/P_c(0)$ .

параметра  $\gamma$  при волновом гетеродинировании продольными упругими волнами в монокристалле молибдата свинца, ориентированном вдоль оси  $[001]$ . Для сравнения на рисунке пунктирными линиями нанесены результаты расчета через эффективную длину взаимодействия [5]. Несовпадение соответствующих графиков обусловлено различием областей применимости двух методов. Оценки  $\beta(\gamma, x)$  через эффективную длину взаимодействия справедливы лишь в приближении заданного поля затухающих накачки и сигнала. Однако при практическом применении волнового гетеродинирования на границе среды возбуждается мощная волна накачки и относительно слабый сигнал, так что амплитуда сигнала сравнима с амплитудой генерируемой волны разностной частоты. В такой ситуации расчет, основанный на эффективной длине взаимодействия, приводит к ошибкам, а предлагаемое решение (2) и, следовательно, (3) является более точным, и оказывается тем точнее, чем ближе мощность волны разностной частоты к начальной мощности сигнальной волны. Так при  $\gamma=0.75$  и  $\gamma=1.25$  различие достигает 10...15%. Следует отметить, что в случае  $\omega_c > \omega_H, \gamma > 1$  решение (2) учитывает истощение сигнальной волны за счет генерации волны разностной частоты и сплошная линия проходит ниже пунктирной, а при  $\omega_c < \omega_H, \gamma < 1$  наблюдается относительное усиление сигнальной волны и мощность волны разностной частоты возрастает по сравнению с результатом, полученным в приближении заданного поля. Из рис. 1 видно, что при  $\gamma$ , близких к единице, обеспечивается наиболее равномерное распределение мощности волны разностной частоты вдоль направления распространения. Критерием равномерности на длине распространения  $l$  может служить величина

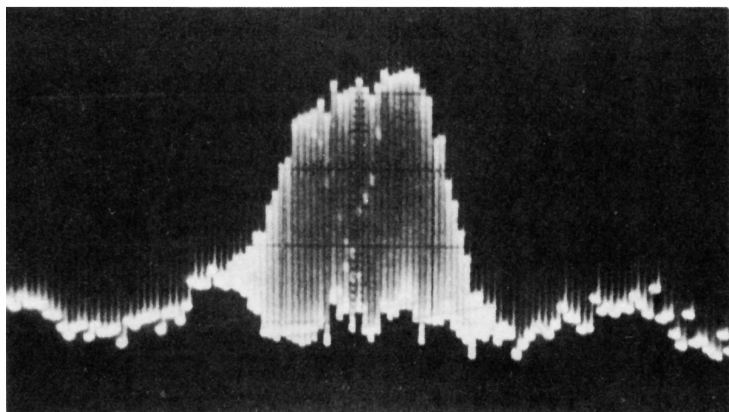


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика акустооптического модулятора с волновым гетеродинамированием продольными упругими волнами в  $PbMoO_4$ .

$$\xi = \frac{1}{\int P_{\rho \max}(\gamma, x) dx} \int_0^l P_{\rho}(\gamma, x) dx, \quad (4)$$

которая с использованием (3) выражается через обобщенные гипергеометрические функции. В устройствах оптической обработки информации неравномерность распределения сигнала по апертуре не должна превышать 3 дБ, что в терминах формулы (4) соответствует условию  $\frac{1}{\sqrt{2}} \leq \xi \leq 1$ . Ограничиваясь уровнем  $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$  из формулы (4) можно определить рабочую апертуру модулятора света с волновым гетеродинамированием упругими волнами. При этом длина распространения волны разностной частоты, рис. 1, существенно больше, чем для исходной сигнальной волны, что и обеспечивает значительное повышение точности обработки информации.

На основе оценок, сделанных по формулам (3) и (4) был создан акустооптический модулятор, экспериментальное исследование которого проведено в макете анализатора спектра радиосигналов СВЧ-диапазона. В качестве материала звукопровода модулятора использовался монокристалл молибдата свинца длиной 25 мм с ориентацией вдоль оси  $[001]$ . Выбор материала обусловлен высокой эффективностью в нем как акустооптического (коэффициент качества  $M_2=25$ ), так и акустического ( $|P| = 17.5$ ) взаимодействий. Пьезопреобразователь представлял собой пластину ниобата лития, среза  $u+36^\circ$ , размером 1 мм x 5 мм, сошлифованную до резонансной частоты 350 МГц. При дифракции света диафрагмировался начальный участок звукопровода, где происходит резкое нарастание мощности волн разностных частот. Полоса пропускания макета составила 35 МГц при частотном разрешении  $\delta f = 160$  кГц. На рис. 2

представлена амплитудно-частотная характеристика акустооптического модулятора с волновым гетеродинированием продольными упругими волнами в молибдате свинца, зарегистрированная многоэлементным фотоприемником типа ЛФ-1024/25. Полученные результаты показывают эффективность применения гетеродинирования упругими волнами для повышения диапазона рабочих частот акустооптических устройств оптической обработки информации, а также для обеспечения их высокого разрешения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А х м а н о в С.А., В ы с л о у х В.А., Ч и р к и н А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988. 312 с.
- [2] С у х о р у к о в А.П. Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике М. Наука, 1988. 232 с.
- [3] Г и б б с Х. Оптическая бистабильность М.: Мир, 1988, 520 с.
- [4] Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган М.: Наука, 1979, 832 с.
- [5] В и н о г р а д о в а М.Б., Р у д е н к о О.В., С у х о р у к о в А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.

Поступило в Редакцию  
18 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 13 12 июля 1989 г.  
03; 12

#### ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ НА РАЗВИТИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЭЙЛОРА

С.Г. З а й ц е в, Е.И. Ч е б о т а р е в а,  
С.Н. Т и т о в, В.Б. Р о з а н о в,  
Е.Г. Г а м а л и й, И.Г. Л е б о

Экспериментальные исследования движения границы контакта жидкость-жидкость и жидкость-газ (см., например, [1, 2]) обнаружили, что в случае ускоренного движения, сообщаемого тяжелой среде более легкой, граница контакта оказывается неустойчивой - неустойчивость Рэля-Тэйлора (НРТ). Значения ускорения  $-g$  в экспериментальных исследованиях НРТ изменялись от 1 до  $10^2 g_0$  ( $g_0 = 989 \text{ см с}^{-2}$ ). Характерной особенностью этих экспериментов являлся разрыв плотности на границе контактирующих сред. Эксперименты обнаружили, что на начальной стадии развития неустойчивости, для которой  $a_0 < \lambda$  ( $a_0$  и  $\lambda$  значений начальной амплитуды