

Институт физики прочности  
и материаловедения  
СО АН СССР, Томск

Поступило в Редакцию  
12 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 19

12 октября 1989 г.

07; 12

## ВОЗБУЖДЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННОМ КОЛЬЦЕВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

А.Г. Булушев, Е.М. Дианов,  
А.В. Кузнецов, О.Г. Охотников,  
В.М. Парамонов

Использование нелинейных эффектов в волоконных световодах, позволяет реализовать солитонный режим передачи импульсов на большие расстояния без искажений [1], получать фазовую модуляцию и эффективно сжимать короткие световые импульсы [2] и т.д. Однако для проявления нелинейных эффектов необходимо использовать достаточно мощные источники излучения и протяженные отрезки световодов. Уменьшить требуемую мощность удастся при использовании высокочастотных волоконных интерферометров, в частности кольцевых [3], позволяющих накапливать значительную энергию излучения внутри резонатора. Для непрерывного резонансного излучения удавалось наблюдать возрастание мощности в волоконном кольцевом интерферометре (ВКИ) примерно в 100 раз [4].

В настоящей работе наблюдалось эффективное увеличение мощности оптического импульса в волоконном кольцевом интерферометре.

Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Излучение полупроводникового лазера с внешним резонатором 1 на основе дифракционной решетки с 600 шт/мм и длиной волны 1.32 мкм, работающего в режиме активной синхронизации мод, вводилось в ВКИ длиной  $L_1 = 0.85$  м из одномодового волоконного световода (ОВС) со ступенчатым профилем показателя преломления и длиной волны отсечки 1.1 мкм. ВКИ был образован с помощью сплавного волоконного ответвителя 2, а его длина могла изменяться пьезокерамическим модулятором 3. Излучение на выходе ВКИ регистрировалось фотоприемником 4.

Коэффициент ввода в ВКИ излучения с широким спектром, значительно превосходящим область свободной дисперсии  $\Delta\nu$  интерферометра (в том числе коэффициент ввода одиночного короткого импульса), определяется коэффициентом прохождения  $t$  ответвителя

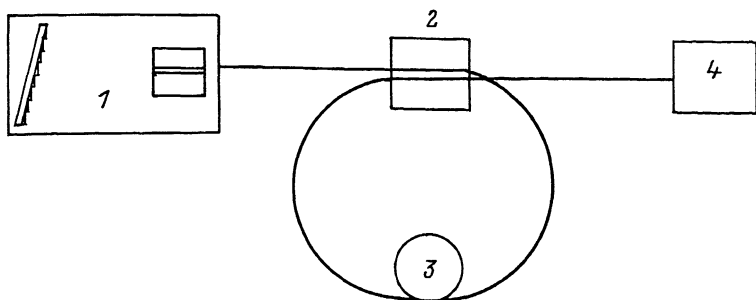


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 - полупроводниковый лазер с внешним резонатором, 2 - сплавной волоконный ответвитель, 3 - пьезо-керамический модулятор, 4 - фотоприемник.

ВКИ и для высокочастотного интерферометра в общем случае мал, т.к.  $t \ll 1$ .

Максимальный ввод наблюдается, когда компоненты входного спектра совпадают с резонансами ВКИ, т.е. фильтрация излучения отсутствует. В простейшем случае в качестве источника излучения для резонансного ввода используют одночастотный лазер [5], частота которого должна совпадать с частотой резонанса ВКИ. В общем случае спектр может состоять из набора гармоник, совпадающих с резонансами ВКИ, расстояние между которыми кратно  $\Delta\nu_I$ .

Такой спектр может быть получен с помощью лазера, оптическая длина резонатора которого совпадает с оптической длиной ВКИ. Для лазера, приведенного на рис. 1, с длиной резонатора  $L_R$  необходимо выполнение условия  $L_R = 0.5nL_I$ , где  $n$  - эффективный показатель преломления для  $HE_{11}$  моды ОВС в ВКИ. При совпадении мод такого лазера с резонансами ВКИ коэффициент ввода мощности  $T_I$  в интерферометр резонансно увеличивается и становится равным

$$T_I = \frac{\alpha t}{(1 - \sqrt{\alpha r})^2} \quad (1)$$

где  $r = 1 - t$  - коэффициент перекачки ответвителя, а  $\alpha$  - коэффициент потерь мощности за один проход ВКИ. Максимум  $T_I^{MAX} = \alpha / (1 - \alpha)$  достигается в точке  $r = \alpha$ , где резонансы ВКИ имеют контраст, равный единице.

Если компоненты входного спектра соответствующим образом сфазированы, что имеет место для лазера с синхронизованными модами, может наблюдаться эффективный ввод последовательности импульсов с частотой следования кратной  $\Delta\nu_I$  за счет интерференции каждого импульса с импульсом, циркулирующим в кольце.

Использованный в эксперименте лазер в непрерывном режиме излучал на многих частотах и, когда частотное расстояние между модами внешнего резонатора  $\Delta\nu_R$  не совпадало с  $\Delta\nu_I = 244$  МГц при медленном сканировании длины ВКИ, сигнал на фотоприемнике

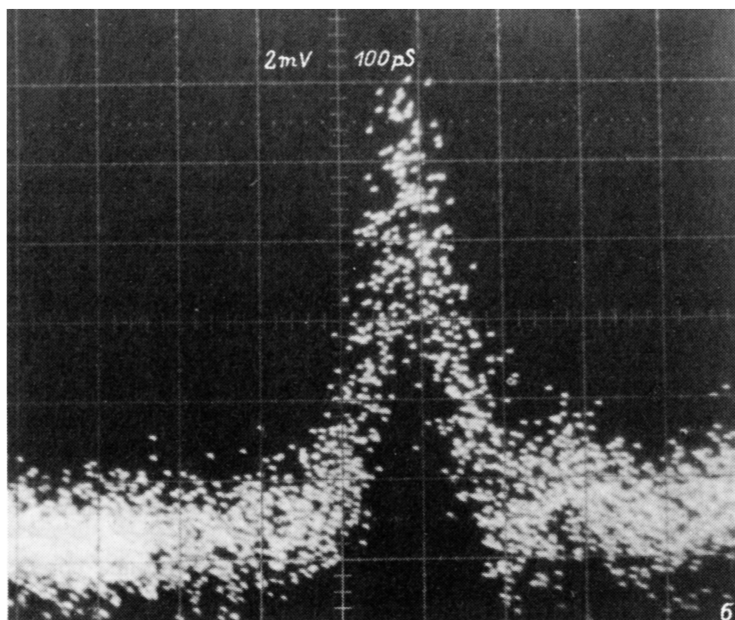
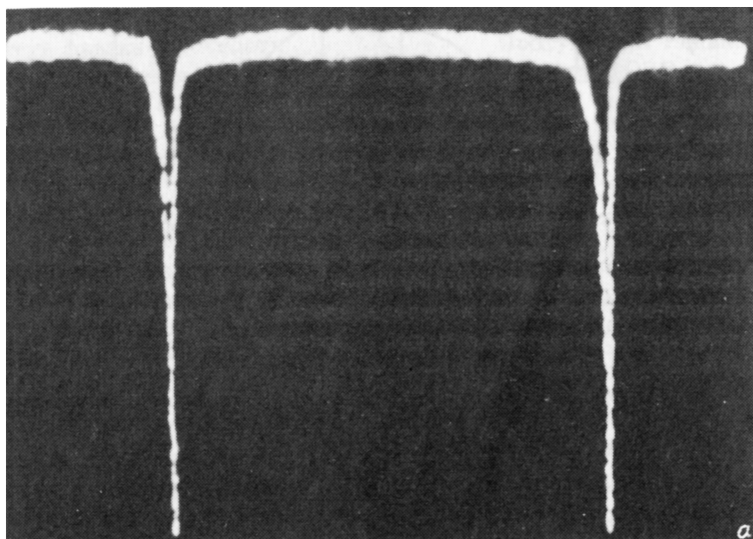


Рис. 2. а - пропускание сканирующего кольцевого интерферометра излучения многочастотного полупроводникового лазера с внешним резонатором с длиной согласованной с интерферометром; б - импульсы излучения на выходе лазера в режиме синхронизации мод; в - уширение спектральных компонент излучения из-за частотной девиации в режиме синхронизации мод.

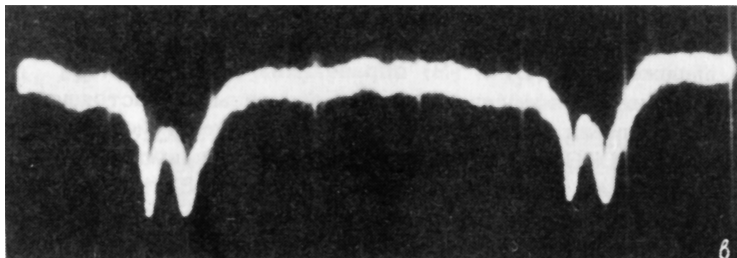


Рис. 2 (продолжение).

4 оставался постоянным. При выполнении условия  $\Delta V_R = \Delta V_I$ , которое достигалось прецизионным сдвигом дифракционной решетки, на выходе ВКИ наблюдались резонансы с контрастом  $K = 0,8$  и эффективная резкость интерферометра была  $\sim 70$  (рис. 2,а).

При подаче на лазерный диод с установленной таким образом длиной внешнего резонатора модуляции тока с частотой  $\sim 244$  МГц возникал режим синхронизации мод, приводящий к появлению на выходе лазера импульсов излучения (рис. 2,б). В данном случае длительность определяется аппаратной функцией фотоприемника с шириной на полувысоте 100 пс.

Для небольшой мощности импульса спектр излучения на выходе сканирующего ВКИ практически совпадал с соответствующим спектром в непрерывном режиме (рис. 2,а). Значительное увеличение мощности приводило к частотной девиации каждой спектральной компоненты (рис. 2,в), обусловленной модуляцией оптической длины лазерного диода при прохождении мощного импульса.

Используя выражения для резкости ВКИ  $F$  и контраста резонансов  $K$

$$K = \frac{2(1-\alpha)t\sqrt{\alpha r}}{(1-\alpha)^2 r + \alpha t^2},$$

$$F = \frac{\pi}{\pi/2 - \arcsin(2\sqrt{\alpha r}/(1+\alpha r))} \approx \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{1+\alpha r}}{1-\sqrt{\alpha r}}, \quad (2)$$

получим для эффективного коэффициента ввода

$$T_I^{\text{эфф}} = \xi T_I = \xi \frac{1-\theta^2}{2\alpha} \frac{1-\alpha}{k(\theta^2+1)+2\theta} \left\{ 1 + K\theta \pm \sqrt{1-K^2} \right\} \approx$$

$$\approx \xi \frac{F}{\pi} \left\{ 1 \pm \sqrt{\frac{1-K}{1+K}} \right\}. \quad (3)$$

Здесь  $\alpha = 1 + \sin \pi (1/F - 0.5)$ ,  $\theta = (1 - \sqrt{2\alpha - \alpha^2}) / (1 - \alpha)$  фактор учитывает ухудшение ввода в интерферометр из-за уширения мод лазера (для излучения с узкими модами  $\xi = 1$ ), а верх-

ний и нижний знаки соответствуют случаям  $\mathcal{J} < \alpha$  и  $\mathcal{J} > \alpha$ . Приближенные выражения в (2) и (3) справедливы для  $\mathcal{F} \gg 1$ .

Максимальный коэффициент ввода, полученный в настоящем эксперименте, составил величину  $\mathcal{T}_r \approx 15$ . При средней мощности лазера, вводимой в ОВС  $\sim 500$  мкВт и длительности импульсов  $\leq 100$  пс, пиковая мощность импульса на входе ВКИ была более 20 мВт, а внутри интерферометра превосходила по оценке 0.3 Вт. Для ВКИ с теми же параметрами эффективный коэффициент ввода и абсолютное значение мощности в ВКИ могут быть существенно увеличены при использовании лазеров с малой частотной девиацией.

Таким образом, в настоящей работе реализован эффективный ввод в ВКИ импульсного излучения из полупроводникового лазера с синхронизацией мод, внешний резонатор которого согласован с оптической длиной ВКИ. Получены выражения, связывающие резкость ВКИ и контраст резонансов с коэффициентом ввода излучения в интерферометр. Согласование оптических длин внешнего резонатора лазера и ВКИ дает возможность измерять спектральную ширину мод лазера как в непрерывном многочастотном режиме, так и в режиме синхронизации мод. Усиление мощности импульсов в ВКИ позволяет наблюдать нелинейные эффекты в ОВС при сравнительно малых входных мощностях. В частности, такой механизм можно использовать для получения в ВКИ фазовой самомодуляции импульса для его сжатия с помощью компрессора.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] M o l l e n a u e r L.F., G o r d o n J.P., I s l a m M.N. // IEEE J. Quant. Electron. 1986. V. 22. N 1. P. 157-173.
- [2] J o h n s o n A.M., S i m p s o n W.M. // J. Opt. Soc. Am. B. 1985. V. 1. N 4. P. 619-625.
- [3] S h e l b y R.M., L e v e n s o n M.D. // J. Opt. Soc. Am. B. 1988. V. 5. P. 347-357.
- [4] B u l u s h e v A.G., D i a n o v E.M., K u z n e t s o v A.V., O k h o t n i k o v O.G. // Electron. Lett. 1988. V. 24. N 18. P. 1172-1173.
- [5] Б у л у ш е в А.Г., Д и а н о в Е.М., К у з н е ц о в А.В., О х о т н и к о в О.Г. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 4. С. 733-736.

Институт общей физики  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
29 мая 1989 г.