

Е. З. ЗЕМЛЯЧЕВ, В. Н. ПАРЫГИН

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ СВЧ-МОДУЛЯТОР СВЕТА

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование СВЧ модулятора света с оптическим резонатором. При частоте модуляции 8,3 Гц, кратной межмодовой разности частот интерферометра, происходит эффективная модуляция света. При определенной расстройке частоты модуляции от межмодовой частоты возможна перекачка энергии, в основном в одну боковую.

Для повышения эффективности работы модуляторов света можно применить оптический резонатор типа Фабри—Перо, заполненный электрооптической средой [1]. Полоса частот такого модулятора ограничена полосой пропускания интерферометра, определяемой его длиной и коэффициентами отражения зеркал. Можно повысить частоту модуляции такой системы, сделав ее равной разности частот соседних мод резонатора. При этом будет происходить перекачка энергии из основной моды интерферометра в соседние. Полоса частот модуляции по-прежнему будет определяться полосой пропускания интерферометра. Поэтому интерференционный модулятор целесообразно применять тогда, когда требуется получить сдвиг частоты света, например при гетеродинаровании. Указанный модулятор можно также использовать для создания многоканальных систем связи. В данной работе исследуется модулятор с резонатором Фабри—Перо, позволяющий осуществить сдвиг частоты на 8,3 Гц при небольшой модулирующей мощности.

Как известно [2], электрическое поле n -ой моды в оптическом резонаторе, заполненном электрооптической средой, удовлетворяет следующему уравнению:

$$\frac{\partial^2 e_n}{\partial t^2} + \omega_n^2 e_n + \delta \frac{\partial e_n}{\partial t} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{n_0^2 r_{ij}}{2} b_{nm} \frac{\partial^2}{\partial t^2} [e_{n+m} + e_{n-m}] = \frac{1}{2} \omega \delta e_0, \quad (1)$$

где e_n — зависящая от времени часть электрического поля, ω_n — собственная частота n -й моды, δ — полоса пропускания оптического резонатора, e_0 — амплитуда, ω — частота падающего света, n_0 — показатель преломления электрооптической среды, r_{ij} — соответствующий электрооптический коэффициент.

Взаимодействие между электрическими полями различных мод имеет место в том случае, когда частота модуляции близка к меж-

модовой частоте, а коэффициент связи $b_{nm} \neq 0$. Коэффициент b_{nm} определяется следующим выражением:

$$b_{nm} = \frac{2}{d} \int_0^d E(x) \sin \frac{\pi n x}{d} \sin \frac{\pi (n \pm m) x}{d} dx,$$

где d — расстояние между зеркалами, $E(x)$ — пространственное распределение модулирующего электрического поля.

Коэффициент b_{nm} максимален при косинусоидальном распределении модулирующего поля $E(x) = E_0 \cos \frac{\pi m x}{d}$. Однако возбуждение СВЧ-колебаний такого типа связано со значительными трудностями. Поэтому нами было применено однородное модулирующее поле, занимающее половину пространства между зеркалами:

$$E(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < x < \frac{d}{4}; \quad \frac{3d}{4} < x < d \\ E_0 & \text{при } \frac{d}{4} < x < \frac{3d}{4}. \end{cases}$$

Коэффициент связи в этом случае будет равен

$$b_{nm} = \frac{2E_0}{\pi} \text{ при } m = 2.$$

Так как при этом перекачка энергии будет происходить не в соседние моды, а в расположенные через одну ($m=2$), частота модуляции должна быть близка к удвоенной разности частот между соседними модами интерферометра.

В силу того что уравнение (1) справедливо для любой моды, электрическое поле в оптическом резонаторе будет представлять собой несущую и бесконечный набор боковых. Это решение найдено в работе [2] при нулевой расстройке частоты модуляции и разности частот соседних мод интерферометра. Однако при отсутствии расстройки в боковую моду удается перекачать только 9,1% интенсивности падающего света. Эта величина может быть увеличена при определенных значениях расстроек частоты модуляции и света. Так как амплитуды боковых составляющих при небольшой модулирующей мощности быстро падают с увеличением номера моды [2], в расчете учитывались только пять связанных мод оптического резонатора.

При таких допущениях из уравнения (1) можно найти выражения для несущей e_n :

$$e_n^2 = \frac{e_0^2}{\left[1 + \frac{\xi^2}{L^2} \left(1 + \frac{\xi^2}{B^2} \right) + \frac{\xi^2}{K^2} \left(1 + \frac{\xi^2}{A^2} \right) \right] + \left\{ \theta - \frac{\xi^2}{L^2} \left[\theta + \sigma - \frac{e_0^2}{B^2} (\theta + 2\sigma) \right] - \frac{\xi^2}{K^2} \left[\theta - \sigma - \frac{\xi^2}{A^2} (\theta - 2\sigma) \right] \right\}} \quad (2)$$

и для боковых $e_{n \pm 2}$, $e_{n \pm 4}$;

$$e_{n-2}^2 = \frac{\xi^2 e_n^2}{L^2}; \quad e_{n+2}^2 = \frac{\xi^2 e_n^2}{K^2};$$

$$e_{n-4}^2 = \frac{\xi^2 e_{n-2}^2}{B^2}; \quad e_{n+4}^2 = \frac{\xi^2 e_{n+2}^2}{A^2}, \quad (3)$$

где

$$K^2 = \left[\theta - \sigma - \frac{\xi^2}{A^2} (\theta - 2\sigma) \right]^2 + \left(1 + \frac{\xi^2}{A^2} \right)^2,$$

$$L^2 = \left[\theta + \sigma - \frac{\xi^2}{A^2} (\theta + 2\sigma) \right]^2 + \left(1 + \frac{\xi^2}{B^2} \right)^2,$$

$$A^2 = 1 + (\theta - 2\sigma)^2, \quad B^2 = 1 + (\theta + 2\sigma)^2,$$

$$\theta = \frac{2(\omega_n - \omega)}{\delta} \text{ — расстройка интерферометра по свету,}$$

$$\sigma = 2 \frac{|\omega_{n\pm 2} - \omega_n| - \Omega}{\delta} \text{ — расстройка частоты модуляции относительно межмодовой разности частот,}$$

$$\xi = \frac{\omega_n n_0^2 r_{ij} b_{nm}}{\delta} \text{ — относительное изменение собственной частоты } n\text{-ой моды, } \Omega \text{ — частота модуляции,}$$

$$\delta = \frac{c(1-R)}{n_0 d \sqrt{R}} \text{ — полоса пропускания интерферометра, } R \text{ — коэффициент отражения зеркал.}$$

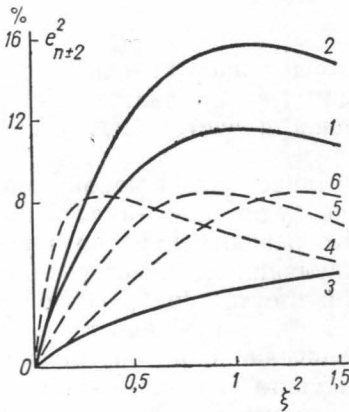


Рис. 1. Зависимости интенсивности первых боковых от модулирующей мощности: 1 — $\theta=0$, $\sigma=0$; 2 и 3 — первая и минус первая боковая при $\theta=1$ и $\sigma=0$; 4 — $\theta=0$, $\sigma=1,5$; 5 — $\theta=1$, $\sigma=1,5$; 6 — $\theta=1,5$, $\sigma=1,5$

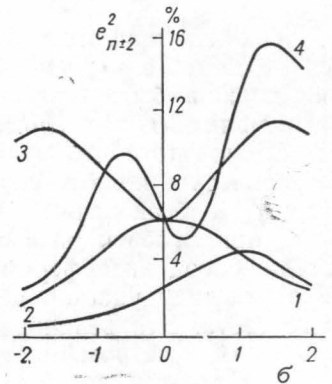


Рис. 2. Частотные зависимости интенсивности первых боковых: 1 — $\theta=0$, $\xi^2=0,1$; 2 — $\theta=1$, $\xi^2=0,1$; 3 — $\theta=0$, $\xi^2=1,1$; 4 — $\theta=1$, $\xi^2=1,1$

Сравнение интерференционного модулятора с обычным фазовым модулятором, имеющим такое же распределение СВЧ-поля, показывает, что выигрыш по потребляемой мощности при применении оптического резонатора равен

$$N^2 = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

и может иметь значительную величину. Например, для $R=0,9$ $N^2=360$.

Зависимости интенсивности первых боковых от модулирующей мощности, рассчитанные на ЭВМ, приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, при нулевой расстройке по СВЧ ($\sigma=0$) в первую боковую можно перекачать только 8,3% падающего света, причем амплитуды левой и правой боковых одинаковы. Этот результат находится в хорошем согласии с результатами работы [2], что оправдывает сделанные допущения.

При ненулевых расстройках модулятора по СВЧ и свету амплитуды правой и левой боковых не будут одинаковы (рис. 1). Максимум энергии, перекачиваемой в первую боковую, возрастает до 15,5% при $\sigma=1,5$ и $\theta=1$. Это объясняется тем, что расстройка по СВЧ уменьшает долю энергии, перекачиваемой из первых боковых в более высокие. Для последних эта расстройка сказывается сильнее и они не попадают в полосу пропускания соответствующих мод интерферометра. Однако с увеличением максимума перекачиваемой энергии падает эффективность интерференционного модулятора. Так, при интенсивности боковой $e_{n\pm 2}^2 = 9,1\%$ изменение собственной частоты n -ной моды $\xi^2=0,4$, а для $e_{n\pm 2}^2 = 15,5\%$ $\xi^2=1,1$, т. е. увеличение интенсивности на 70% потребовало увеличения мощности в 2,75 раза.

Частотные зависимости интенсивности первых боковых показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, уже при малых значениях ξ^2 обна-

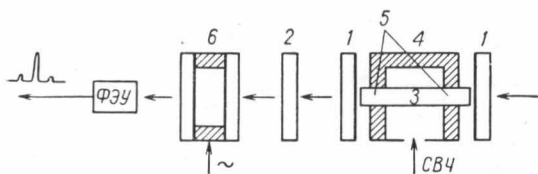


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — зеркало, 2 — развязка, 3 — кристалл, 4 — СВЧ-резонатор, 5 — заградительные волноводы и 6 — сканирующий интерферометр

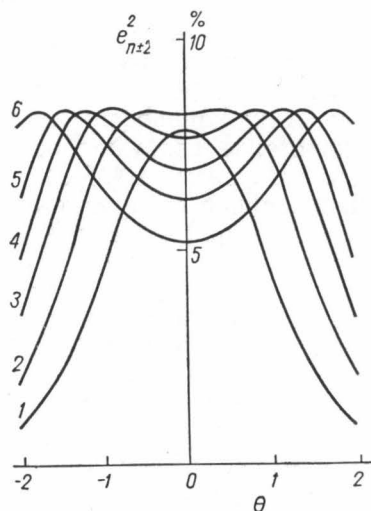


Рис. 3. Зависимость интенсивности первых боковых от расстройки интерферометра по свету. $\sigma=0$. 1 — $\xi^2=0,2$; 2 — $\xi^2=0,4$; 3 — $\xi^2=0,6$; 4 — $\xi^2=0,8$; 5 — $\xi^2=1$ и 6 — $\xi^2=1,4$

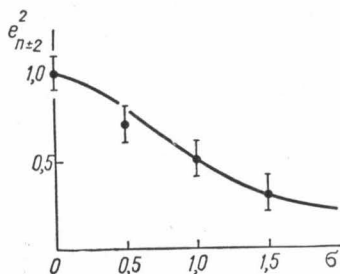


Рис. 5. Частотная зависимость интенсивности первых боковых для малых индексов модуляции при $\theta=0$. (сплошная кривая — теория, точки — эксперимент)

руживается расширение полосы частот модуляции, обусловленное взаимодействием основной моды с соседними. Для больших значений ξ^2 моды оказываются сильно связанными. Частотные характеристики в этом случае имеют вид двугорбых кривых, симметричных при $\theta=0$ и несимметричных при $\theta \neq 0$.

На рис. 3 показаны зависимости интенсивности первых боковых от расстройки интерферометра по свету для различных значений ξ^2 .

Зависимости интенсивности первых боковых от модулирующей мощности, рассчитанные на ЭВМ, приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, при нулевой расстройке по СВЧ ($\sigma=0$) в первую боковую можно перекачать только 8,3% падающего света, причем амплитуды левой и правой боковых одинаковы. Этот результат находится в хорошем согласии с результатами работы [2], что оправдывает сделанные допущения.

При ненулевых расстройках модулятора по СВЧ и свету амплитуды правой и левой боковых не будут одинаковы (рис. 1). Максимум энергии, перекачиваемой в первую боковую, возрастает до 15,5% при $\sigma=1,5$ и $\theta=1$. Это объясняется тем, что расстройка по СВЧ уменьшает долю энергии, перекачиваемой из первых боковых в более высокие. Для последних эта расстройка сказывается сильнее и они не попадают в полосу пропускания соответствующих мод интерферометра. Однако с увеличением максимума перекачиваемой энергии падает эффективность интерференционного модулятора. Так, при интенсивности боковой $e_{n\pm 2}^2 = 9,1\%$ изменение собственной частоты n -ной моды $\xi^2=0,4$, а для $e_{n\pm 2}^2 = 15,5\%$ $\xi^2=1,1$, т. е. увеличение интенсивности на 70% потребовало увеличения мощности в 2,75 раза.

Частотные зависимости интенсивности первых боковых показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, уже при малых значениях ξ^2 обна-

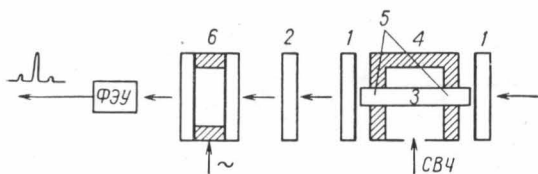


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — зеркало, 2 — развязка, 3 — кристалл, 4 — СВЧ-резонатор, 5 — запердельные волноводы и 6 — сканирующий интерферометр

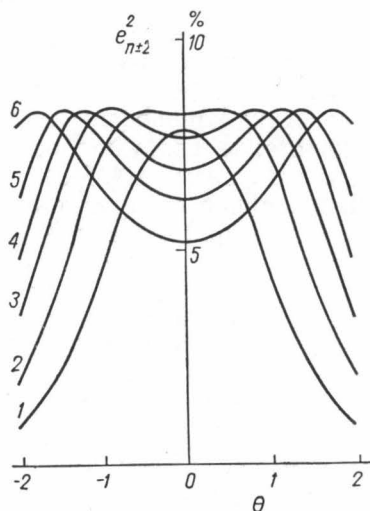


Рис. 3. Зависимость интенсивности первых боковых от расстройки интерферометра по свету. $\sigma=0$. 1 — $\xi^2=0,2$; 2 — $\xi^2=0,4$; 3 — $\xi^2=0,6$; 4 — $\xi^2=0,8$; 5 — $\xi^2=1$ и 6 — $\xi^2=1,4$

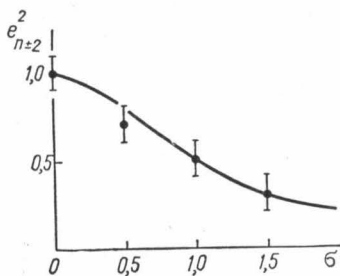


Рис. 5. Частотная зависимость интенсивности первых боковых для малых индексов модуляции при $\theta=0$. (сплошная кривая — теория, точки — эксперимент)

руживается расширение полосы частот модуляции, обусловленное взаимодействием основной моды с соседними. Для больших значений ξ^2 моды оказываются сильно связанными. Частотные характеристики в этом случае имеют вид двугорбых кривых, симметричных при $\theta=0$ и несимметричных при $\theta \neq 0$.

На рис. 3 показаны зависимости интенсивности первых боковых от расстройки интерферометра по свету для различных значений ξ^2 .

Для $\sigma=0$ и для больших значений ξ^2 кривые интенсивности являются двугорбыми и мало зависят от θ , что позволяет уменьшить требования, предъявляемые к точности настройки интерферометра на частоту света.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

В качестве источника света использовался стабилизированный одночастотный He—Ne лазер. Модуляция света осуществлялась кристаллом КДР размером $5 \times 5 \times 23,5$ мм, помещенным внутрь интерферометра Фабри—Перо. Ось z кристалла и модулирующее электрическое поле были направлены по оптической оси интерферометра. СВЧ поле в кристалле возбуждалось с помощью прямоугольного резонатора, имеющего размеры $7 \times 5 \times 10$ мм (тип волны E_{110}). Электрическое поле было отлично от нуля только в середине кристалла на длине 10 мм. На краях кристалла поле отсутствовало, так как отверстия в стенках резонатора являлись запредельными волноводами. Для уменьшения потерь света зазоры между торцами кристалла и зеркалами заполнялись иммерсионной жидкостью. При применении диэлектрических зеркал, имеющих коэффициент отражения $R=0,96$, выигрыш по мощности был равен 500, что позволило в качестве источника мощности СВЧ применить отражательный клистрон. Спектр модулированного сигнала наблюдался с помощью сканирующего интерферометра Фабри—Перо. При модулирующей мощности 60 мвт на длине волны 3,6 см интенсивность боковых составляющих по отношению к несущей была равна 0,5%, что соответствует индексу фазовой модуляции 0,14.

Экспериментально измеренная частотная характеристика первых боковых представлена на рис. 5 вместе с расчетной кривой. Как видно из рисунка, данные эксперимента находятся в хорошем согласии с теорией. Полоса частот модуляции была равна 200 мГц. Потери интенсивности прошедшего света составляли 65%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Землячев Е. З., Парыгин В. Н. «Радиотехника и электроника», 16, № 6, 1971.
2. Gordon E. I., Rigden J. D. Bell System Techn. J. 42, No. 1, 1963.

Поступила в редакцию
25.1 1972 г.

Кафедра
физики колебаний