

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3 — 1971

УДК 535.241.13

Е. Р. МУСТЕЛЬ, В. Н. ПАРЫГИН, Л. В. СИМОНЯН

МНОГОРЕЗОНАТОРНЫЙ МОДУЛЯТОР СВЕТА

В статье содержится теоретическое и экспериментальное исследование асинхронного многорезонаторного модулятора света, использующего общий для всех резонаторов электрооптический кристалл. Экспериментально для пяти резонаторов получено увеличение качества модулятора в 4,4 раза. Глубина модуляции при этом была 9% при импульсной мощности 1,6 вт.

Как известно, СВЧ-модуляторы света подразделяются на два класса: синхронные модуляторы [1, 2] и асинхронные [3, 4]. В синхронных модуляторах необходимо согласование скоростей света и волны СВЧ. В асинхронных синхронизм скоростей не требуется, но накладывается ограничение на длину модулирующего электрооптического кристалла. Оптимальная длина асинхронного модулятора [1], определяемая расстоянием, на котором происходит накопление фазовой задержки, равна

$$l_{\text{опт}} = \frac{\pi}{\Omega \left(\frac{1}{v_{\text{св}}} - \frac{1}{v_{\text{м}}} \right)}$$

Здесь Ω — частота модуляции, $v_{\text{св}}$ и $v_{\text{м}}$ — скорости света и модулирующей волны соответственно.

При использовании однородного в направлении распространения света электрического поля

$$l_{\text{опт}} = \frac{\pi c}{\Omega \cdot n},$$

где n — показатель преломления света в электрооптической среде. С ростом частоты $l_{\text{опт}}$ уменьшается и для модулятора на кристаллах типа КДР при частоте модуляции $f_{\text{м}} = \frac{\Omega}{2\pi} = 10 \text{ ГГц}$ составляет примерно 1 см. При такой малой длине модулятора мощность, необходимая для получения большой глубины модуляции, оказывается весьма значительной [4].

В данной статье исследуется модулятор асинхронного типа, в котором длина модулирующего кристалла значительно увеличена по сравнению с $l_{\text{опт}}$. Для обеспечения длительного взаимодействия света с модулирующим полем модулятор выполнен в виде цепочки СВЧ-резонаторов каждый длиной $l_{\text{опт}}$ с общим кристаллом длиной $N_{\text{опт}}$ (рис. 1).

Возбуждение в каждом из резонаторов (6) колебаний типа E_{110} осуществляется волной H_{10} , бегущей в волноводе (8).

Размеры системы рассчитываются так, чтобы свет в каждом из последующих резонаторов модулировался СВЧ-полем той же фазы, что и при прохождении предыдущего резонатора. Для выполнения этого усло-

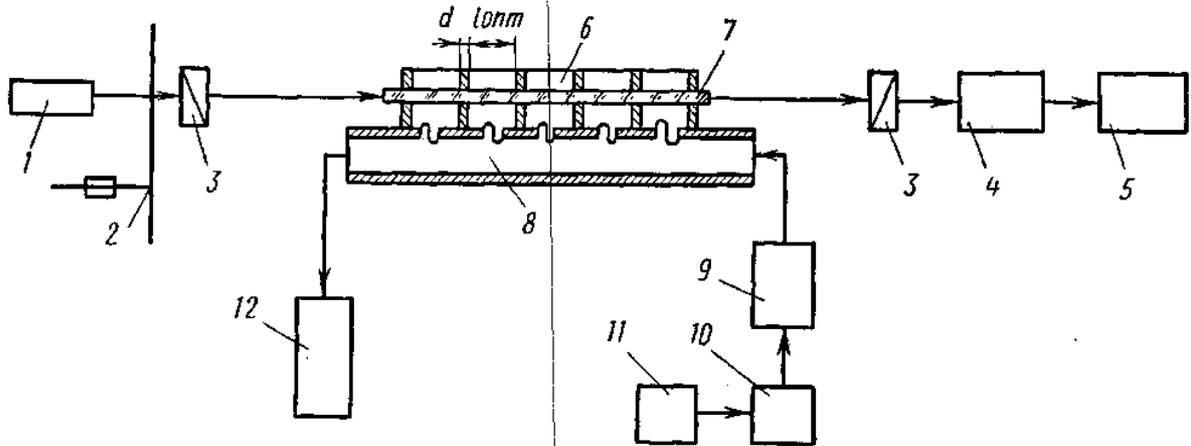


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 — He—Ne-лазер, 2 — прерыватель, 3 — поляризатор, 4 — ФЭУ, 5 — осциллограф, 6 — резонаторы, 7 — модулирующий кристалл, 8 — волновод, 9 — измеритель КСВ 60И, 10 — плавный аттенюатор, 11 — магнетрон, 12 — измеритель мощности 45И

вия необходимо, чтобы за время $t_{св}$, в течение которого свет проходит расстояние $L = l_{опт} + d$, фаза СВЧ-волны в волноводе изменялась бы на $m \cdot 2\pi$, где m — целое число. Это изменение фазы равно

$$\Delta\varphi = \Omega t_{св} \mp kL,$$

где волновое число $k = \frac{2\pi}{\lambda_{в}} = \frac{2\pi c}{\lambda_{м} v_{мф}}$, $v_{мф}$ — фазовая скорость СВЧ-волны в волноводе. Знак минус относится к волне СВЧ, распространяющейся в том же направлении, что и свет, знак плюс — к волне, бегущей в противоположном направлении. Из условия

$$\Delta\varphi = 2\pi \quad (1)$$

получим соотношение, из которого определяется длина

$$L = \frac{\lambda_{м}}{(n \mp c/v_{мф})}.$$

Для модулятора на кристалле типа KDP с $n=1,5$ и длине волны $\lambda_{м}=3,2$ см получаем в зависимости от знака два значения: $L_{-}=4,2$ см и $L_{+}=1,43$ см. Так как $l_{опт}=1,06$ см, то первый случай практически не пригоден, большая часть кристалла не используется для модуляции. В исследуемой нами системе $L=L_{+}$ толщина стенок составила 0,35 см. В этом случае накопление фазовой задержки будет происходить при противоположных направлениях распространения света и СВЧ-волны.

Если при увеличении числа резонаторов поддерживать постоянной амплитуду электрического поля E_0 , то полная фазовая задержка в системе из N идентичных резонаторов при выполнении условия (1) равна

$$\Gamma_{\Sigma} = N\Gamma_1, \quad (2)$$

где Γ_1 — фазовая задержка, создаваемая одним резонатором длины $l_{\text{опт}}$, равная

$$\Gamma_1 = \frac{2E_0 l}{k U_{\lambda/2}} \sin \Omega t = \Gamma_0 \sin \Omega t,$$

где $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение.

Если условие (1) не выполняется, т. е. фазовые условия не оптимальны, суммарная фазовая задержка определяется из соотношения

$$\Gamma_2 = \Gamma_0 \sum_{n=1}^N \sin (\Omega t + n \Delta \varphi). \quad (3)$$

В системах СВЧ обычно задается мощность P . Так как с увеличением N в этом случае E_0 уменьшается в \sqrt{N} раз, суммарная фазовая задержка при оптимальных фазовых условиях будет равна

$$\Gamma_2 = \sqrt{N} \Gamma_1. \quad (4)$$

Соответственно качество модулятора q , определяемое как отношение квадрата амплитуды фазовой задержки к модулирующей мощности [1], растет пропорционально числу резонаторов N .

В литературе [3, 4] описаны асинхронные модуляторы, в которых накопление фазовой задержки обеспечивается поворотом каждого последующего кристалла на 90° по отношению к предыдущему.

Преимуществом исследуемой нами системы является использование одного кристалла. При этом отпадает необходимость взаимной юстировки кристаллов и обеспечения оптического контакта между ними. Дополнительное преимущество предлагаемого модулятора состоит в компенсации затухания волны СВЧ за счет энергии, поступающей из волновода.

Соотношения (2) — (4) справедливы лишь при отсутствии связи между резонаторами. Для того чтобы учесть влияние связи, была рассмотрена система из N последовательно связанных идентичных контуров, возбуждаемых источниками э. д. с. Между источниками существует постоянный сдвиг фаз, определяемый расположением возбуждающих петель связи в волноводе. Суммарная фазовая задержка пропорциональна модулю суммы комплексных амплитуд токов в отдельных контурах. Значения токов в каждом последующем контуре берутся в моменты времени, отличающиеся друг от друга на $t_{\text{св}}$. Наличие связи между контурами приводит к тому, что даже при оптимальных фазовых условиях фазовая задержка в каждом из резонаторов не одинакова, и поэтому Γ_2 при заданном E_0 меньше, чем $N\Gamma_1$.

На рис. 2 приведены результаты расчета такой системы с $N=2$ и $N=3$ для случая слабой связи между контурами. Как видно из рисунка, с увеличением связи Γ_2 уменьшается. На этом же рисунке построена зависимость Γ_2 от N для $\Delta\varphi=0,7$. В этом случае накопление фазовой задержки отсутствует.

Экспериментальная часть

Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. В качестве источника света использовался He—Ne лазер (1) с длиной волны 0,63 мк. Источником СВЧ-мощности ($\lambda_m=3,2$ см) служил магнетрон (11), работающий в импульсном режиме. Измеритель СВЧ-мощности (12) одновременно являлся согласованной нагрузкой для волны H_{10} , бегущей в волноводе (8). На волноводе укреплен блок из пяти связанных резона-

торов (6). Возбуждение в резонаторах колебания типа E_{110} осуществлялось петлями связи. Относительные размеры петель связи подбирались таким образом, чтобы в каждый резонатор поступала одинаковая мощность P/N . Для настройки системы на заданную частоту модуляции одна из боковых стенок каждого из резонаторов делалась подвижной. В качестве электрооптического кристалла, общего для всех резонаторов,

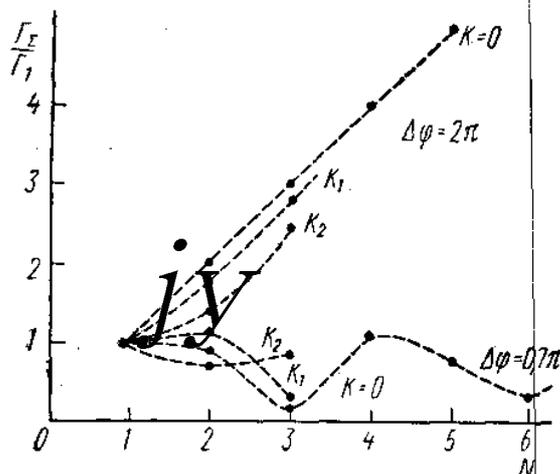


Рис. 2. Зависимость Γ_{Σ}/Γ_1 от числа резонаторов N . K — коэффициент связи между контурами $K_1 < K_2$

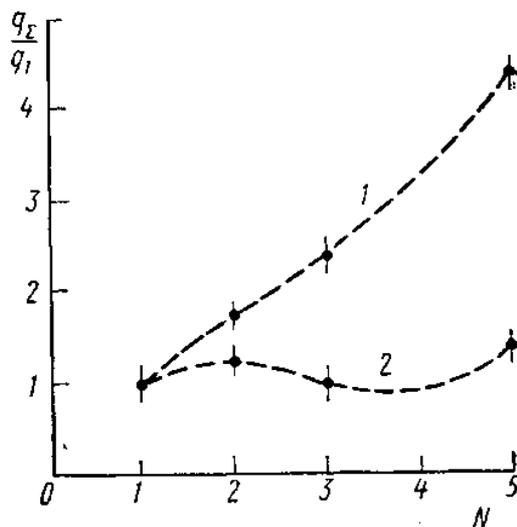


Рис. 3. Экспериментальная зависимость q_{Σ}/q_1 от числа резонаторов.

использовался кристалл ADP z -среза размерами $2,2 \times 2,2 \times 88$ мм³. Паразитная связь между резонаторами возникала за счет просачивания энергии через отверстия для света, являющиеся запредельными волноводами, а также через питающий волновод. Эксперимент показал, что эта связь невелика (резонансные кривые были одnogорбыми).

Экспериментально исследовалась зависимость качества модулятора от числа резонаторов. Как видно из рис. 3 (кривая 1), качество модулятора q растет с увеличением числа резонаторов. Увеличение q при $N=5$ по сравнению со случаем $N=1$ составило 4,4. Отличие этой величины от теоретически ожидаемого значения может быть объяснено наличием связи между резонаторами, их неидентичностью и неравномерным распределением энергии по резонаторам. Глубина модуляции $m = \sin \Gamma$ для $N=5$ достигала 9% при импульсной мощности 1,6 вт. На этом же рисунке приведена зависимость качества модулятора от N при одинаковом направлении распространения света и СВЧ-волны (кривая 2). Как и следовало ожидать, в этом случае не происходит накопления фазовой задержки. Кривая 2 снята при той же настройке системы, что и кривая 1. Сдвиг фаз $\Delta\varphi$ составил при этом $0,7\pi$.

В СВЧ-модуляторах света большую роль играют тепловые эффекты, связанные с нагревом кристалла модулирующей мощностью. Возникающие тепловые градиенты ограничивают эффективность модулятора, работающего в непрерывном режиме.

При учете только радиальных градиентов [5] интенсивность света на выходе модулятора равна

$$\frac{I}{I_0} = H(\alpha P) \sin \sqrt{qP},$$

$$H(y) = \frac{1}{y} \int_0^y J_0(x) dx,$$

где J_0 — функция Бесселя нулевого порядка, α — коэффициент, зависящий от упругих и теплопроводных свойств кристалла, P — средняя мощность.

С ростом средней мощности эффективность модуляции падает в соответствии с изменением функции $H(\alpha P)$. Средняя модулирующая мощность, при которой происходит уменьшение глубины модуляции в определенное число раз, не зависит от геометрии кристалла. Постоянная составляющая интенсивности света на выходе модулятора со скрещенными поляроидами равна

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} [1 - H(\alpha P) J_0(\sqrt{qP})].$$

При этом αP и qP обычно малы, поэтому с точностью до величин второго порядка малости эта зависимость может быть представлена в виде

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(\alpha P)^2}{24} + \frac{1}{8} \left[qP - \frac{(qP)^2}{16} \right]. \quad (5)$$

Первый член этого выражения есть постоянная составляющая интенсивности, возникающая за счет двулучепреломления, вызванного нагревом кристалла, второй член обусловлен полезным модулирующим сигналом. По соотношению величины импульса на экране осциллографа к уровню шумов в промежутке между импульсами можно судить о соотношении обоих членов в (5). При малом P преобладает полезный сигнал. С ростом P возрастает роль первого члена (обычно $q \ll \alpha$) и, начиная с некоторого P , преобладающую роль играет постоянная составляющая, связанная с нагревом кристалла. Шумы на выходе ФЭУ растут быстрее, чем полезный сигнал. Полученная нами экспериментально зависимость $I/I_0 \sim (\alpha P)^2$ одинакова для $N=1$ и $N=5$. Это подтверждает независимость α от геометрии.

Таким образом, увеличение мощности выше определенного значения, не зависящего от геометрии кристалла, не приводит к увеличению глубины модуляции. Глубина модуляции может быть увеличена лишь за счет q , т. е. в нашей схеме за счет числа резонаторов N при той же общей модулирующей мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kamipow I. P., Liu J. Proc. IEEE, 51, No. 1, 132, 1963.
2. Kamipow I. P., Kompfner W. R., Lusell W. H. IRE Trans Microwave, Theor. and Techn., 10, No. 5, 311, 1962.
3. Myers R. A., Pershan P. S. J. Appl. Phys., 36, No. 1, 22, 1965.
4. Дианова В. А., Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. «Радиотехника и электроника», 11, № 5, 947, 1966.
5. Kamipow I. P. Appl. Optics., 3, No. 4, 511, 1964.

Поступила в редакцию
2.6 1970 г.

Кафедра
физики колебаний