

07;12

Волоконно-оптический фазовый модулятор, обеспечивающий диапазон сдвига оптической частоты до 20 GHz

© А.М. Мамедов, В.Т. Потапов, С.В. Шаталин

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

E-mail: mamedov@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 23 ноября 2001 г.

Рассмотрен волоконно-оптический фазовый модулятор, в котором для модуляции фазы световой волны, распространяющейся в оптическом волокне, используется электромеханический составной резонатор с добротностью $\cong 1000$. При этом мгновенная частота световой волны на выходе модулятора изменялась по гармоническому закону. Достигнутый в эксперименте диапазон перестройки мгновенной частоты световой волны составлял 20 GHz, что соответствовало индексу модуляции $\cong 10^6$. Показано, что максимальная величина диапазона перестройки частоты определяется пределом упругости материала резонатора.

Среди широкого спектра применений лазеров с перестраиваемой частотой, наряду с когерентной частотной рефлектометрией [1], стимулировавшей настоящую работу, можно указать также тестирование интегрально-оптических структур [2], калибровку фотоприемников [3] и др.

В когерентной частотной рефлектометрии (Optical Frequency Domain Reflectometry) осуществляется линейное свипирование частоты световой волны, при этом в сигнале биения опорной и рассеянной волн различные спектральные составляющие однозначно соответствуют различным участкам тестируемой линии или пассивной мультиплексной сети волоконно-оптических датчиков. Однако минимальная ширина линии излучения существующих перестраиваемых полупроводниковых лазеров на сегодня составляет несколько сотен килогерц, что в свою очередь ограничивает диапазон тестируемых длин до нескольких сотен метров [1].

В качестве альтернативы прямой модуляции в [4] использовался электрооптический модулятор, при этом источник излучал на фикси-

рованной частоте, а модуляция осуществлялась за источником. Такой подход требует применения быстродействующей системы обработки с полосой частот до нескольких GHz, так как частота сдвига оптической волны равна частоте электрического сигнала модуляции. Другим же недостатком этой схемы является наличие гармоник модуляции, которые приводят к нелинейным искажениям сигнала биений фототока во второй гармонике.

В [5] был предложен волоконно-оптический модулятор, в котором фаза световой волны, распространяющейся в оптическом волокне, изменялась за счет растяжения световода, намотанного на пьезокерамический цилиндр. Такое техническое решение обладает естественной совместимостью с одномодовыми волоконно-оптическими устройствами и не „привязан“ к конкретному типу источника излучения. Кроме того, отсутствует проблема гармоник и благодаря низкой частоте резонанса пьезокерамического цилиндра ($\cong 25$ kHz) не требуется широкополосная электронная схема обработки. К недостаткам же модулятора следует отнести его низкую добротность ($\cong 25$), так как для достижения диапазона перестройки частоты 4 GHz необходимо было рассеивать на модуляторе значительную мощность (8 W).

В настоящей работе мы реализовали волоконно-оптический фазовый модулятор на основе составного резонатора (рис. 1, *a*), на который было намотано ≈ 300 м одномодового оптического волокна.

Теория. Для исследования модуляции частоты излучения мы использовали схему двухлучевого интерферометра (рис. 1, *b*). В случае источника с двумя продольными модами фототок i определяется интерференцией на фотоприемнике четырех волн:

$$i \approx \langle r a_1 \cdot \cos \omega t + r a_2 \cdot \cos(\omega t + \Delta \omega t) + a_1 t^2 \cdot \cos(\omega t + \varphi) + a_2 t^2 \cdot \cos(\omega t + \Delta \omega t + \varphi) \rangle^2; \quad (1)$$

здесь r и t — амплитудные коэффициенты отражения и пропускания интерферометра; a_1 и a_2 — амплитуды продольных мод; φ — набег фазы, угловые скобки обозначают усреднение по времени; ω — циклическая частота световой волны; $\Delta \omega = 2\pi \Delta \nu$ — межмодовое расстояние.

Пусть в интерферометр введен фазовый модулятор, так что $\varphi = \varphi_m \cos \Omega_m t$, тогда при условии $\varphi_m \gg 1$ соотношение (1) преоб-

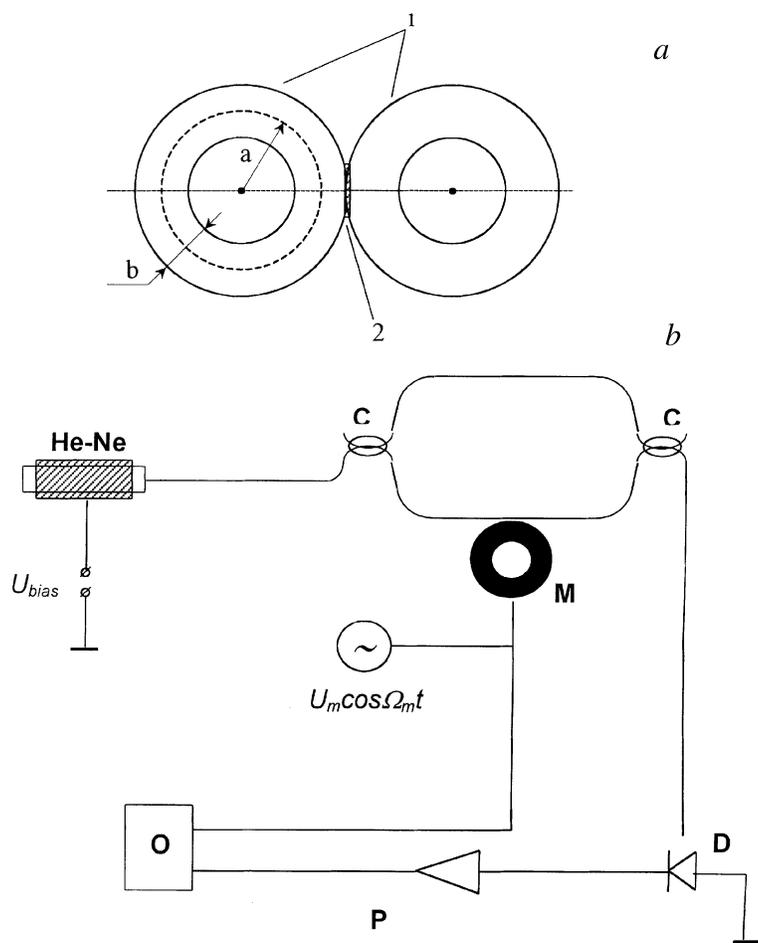


Рис. 1. *a* — составной резонатор цилиндрической конфигурации (вид сверху): *1* — бронзовый цилиндр, *2* — пьезокерамический преобразователь; *b* — схема экспериментальной установки: *D* — фотодиод; *C* — волоконно-оптический ответвитель, *M* — волоконно-оптический фазовый модулятор, *O* — осциллограф, *P* — усилитель.

разуется к виду

$$i(t) = G[\Omega(t)] \cdot \left\{ A \cos \int_0^t \Omega(t) dt + B \cos \int_0^t [\Omega(t) \pm \Delta\omega] dt \right\}, \quad (2)$$

где введены выражения для мгновенной частоты $\Omega(t) = \varphi_m \Omega_m \sin \Omega_m t$ и амплитуд биений $A = r t^2 (a_1^2 + a_2^2)$ и $B = r t^2 a_1 a_2$.

В качестве коэффициента пропорциональности выступает спектральный отклик фотоприемника на мгновенной частоте $G[\Omega(t)]$, постоянная составляющая фототока для простоты отброшена, т. е. предполагаем, что $G(0) = 0$.

В режиме одномодовой генерации лазера $a_2 = 0$, $B = 0$ и на фотоприемник падает амплитудно-модулированная волна, частота модуляции которой периодически меняется от 0 до $\Omega_{\max} = \varphi_m \Omega_m$. В моменты времени, для которых справедливо соотношение $\Omega_m t \ll 1$, наблюдается линейный закон модуляции частоты, и огибающая фототока в этом случае равна

$$\bar{i}(t) \cong \frac{A}{2} G(\Omega_{\max} \Omega_m t). \quad (3)$$

Выражение (3) представляет также практический интерес для задачи определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фотоприемных структур: на экране осциллографа в качестве огибающей фототока непосредственно визуализируется частотный отклик фотоприемника.

Для калибровки фазового модулятора более удобен двухмодовый режим генерации лазера $a_1 = a_2$ и $B \neq 0$. В этом случае фотоприемник регистрирует биения не только вблизи нулевой частоты, но и еще в моменты τ , для которых $\Omega(\tau) = \Delta\omega$.

Таким образом легко определить величину девиации частоты световой волны:

$$\Omega_{\max} = \frac{\Delta\omega}{\sin \Omega_m \tau}. \quad (4)$$

Теперь проанализируем факторы, определяющие диапазон девиации частоты.

Индекс модуляции фазы φ_m , следовательно и диапазон девиации мгновенной частоты Ω_{\max} световой волны, пропорционален амплитуде деформаций волокна. Пусть Δl — амплитуда деформации половины

витка волокна, N — число витков, тогда:

$$\Omega_{\max} = \frac{4\pi n}{\lambda} N \Omega_m \cdot \Delta l, \quad (5)$$

где λ — длина волны излучения, n — показатель преломления сердцевины волокна.

Из общих соображений амплитуда колебаний резонатора, а значит и деформация волокна Δl , ограничивается тремя параметрами:

- пределом упругости оптического волокна;
- мощностью, переданной составному резонатору;
- пределом упругости материала резонатора.

Предел упругости волокна достигается лишь при относительных деформациях волокна порядка 1% [1], таких деформаций в динамическом режиме можно достичь только в металлических стеклах либо подвергнутой специальной обработке бериллиевой бронзе.

Что касается последних двух параметров, то, как и в случае пьезокерамического модулятора [5], при низких добротностях резонатора основным фактором, ограничивающим амплитуду деформаций, является мощность, переданная резонатору. Однако ситуация коренным образом изменится в случае очень больших добротностей, поскольку легко можно достичь деформаций, соответствующих пределу упругости. Остановимся подробнее на последнем случае.

Для модулятора цилиндрической конфигурации, использующего основную изгибную моду, нетрудно получить [6]:

$$\Delta l = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sigma}{E} \cdot \frac{r_0^2}{d}, \quad (6)$$

где σ — амплитуда упругого напряжения; E — модуль упругости материала модулятора; r_0 — радиус цилиндра; d — толщина стенки цилиндра.

Формула (6) получена в предположении малости толщины стенки цилиндра d по сравнению с радиусом r_0 . Все наши дальнейшие формулы также будут относиться к случаю тонкостенного цилиндра.

Частота основной изгибной моды тонкостенного цилиндра определяется формулой [6]:

$$\Omega_m \cong 0.48 \frac{d}{r_0^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (7)$$

где ρ — плотность материала модулятора.

Из формул (5), (6) и (7) получаем выражение, связывающее величину девиации мгновенной частоты с физико-механическими характеристиками материала модулятора:

$$\frac{\Omega_{\max}}{2\pi} = 1.28 \frac{n}{\lambda} N \sqrt{\frac{\sigma^2}{E\rho}}. \quad (8)$$

Физический смысл выражения под знаком корня — удельная упругая энергия, запасенная в единице массы деформированного элемента. Таким образом, из (8) следует, что величина диапазона девиации мгновенной частоты определяется модулем упругости E , плотностью ρ материала модулятора и значением упругого напряжения σ . В действительности же максимально допустимое упругое напряжение σ ограничено пределом упругости $\sigma_{elas.}$ материала модулятора, так как для значений $\sigma \geq \sigma_{elas.}$ нарушается условие применимости закона Гука, осциллятор становится нелинейным и система выходит из резонанса.

Известно [7], что величина $\sqrt{\sigma_{elas.}^2/\rho E}$ максимальна для цветных сплавов на основе сплавов меди. Причем существует промышленно освоенная технология термической обработки, позволяющая увеличить более чем на порядок величину предела упругости $\sigma_{elas.}$.

Для нахождения переданной мощности сначала мы вычислили запасенную в резонаторе механическую энергию U , исходя из явного вида основной изгибной моды:

$$U = \frac{13}{16} M \cdot \Omega_m^2 \cdot S^2, \quad (9)$$

где M — масса цилиндра, Ω_m — резонансная частота, S — максимальная амплитуда колебаний изгиба цилиндра.

С другой стороны, амплитуда S изгибных колебаний связана с диапазоном перестройки $\nu_{\max} = \Omega_{\max}/2\pi$ мгновенной частоты следующим образом:

$$S = \frac{\nu_{\max} \lambda}{4N\Omega_m n}. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) совместно с формулой для переданной резонатору мощности $P = (\Omega_m U)/Q$ позволяет получить величину диапазона девиации частоты:

$$\nu_{\max} = \frac{16 \cdot N \cdot n}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot Q}{M \cdot \Omega_m}}. \quad (11)$$

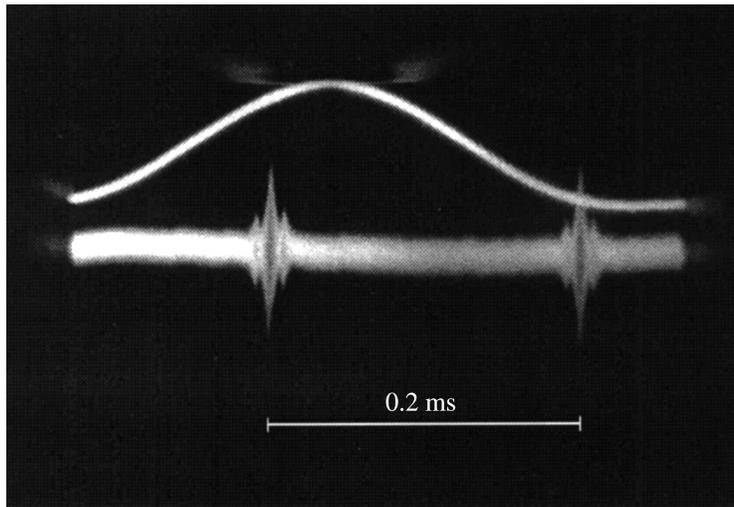


Рис. 2. Оциллограмма отклика фотоприемника в режиме двухмодовой генерации лазера.

Из последнего выражения видно, что для увеличения диапазона девиации частоты необходимо снизить частоту резонанса Ω_m и повысить соответственно добротность и переданную резонатору мощность.

Эксперимент. Источником излучения в эксперименте является He-Ne-лазер ЛГН-207 ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$). По сравнению с серийной модификацией в нашем макете была предусмотрена возможность перестройки частоты резонатора относительно контура усиления, что позволяло осуществлять переключение лазера с двухмодового на одномодовый режим излучения. В качестве интерферометрической схемы была выбрана конфигурация двухлучевого интерферометра (рис. 1, *b*), в сигнальное плечо которого был внесен фазовый модулятор.

Волоконно-оптический фазовый модулятор состоял из $\cong 300$ m одномодового световода, намотанного в 7 слоев, виток к витку ($\cong 1000$ витков) на электромеханический составной резонатор, который представлял собой два упругих цилиндрических элемента из бронзы, приложенных друг к другу вдоль образующей. С помощью пьезокерамических преобразователей возбуждалась основная изгибная мода цилиндрического упругого элемента на частоте $\cong 4.9$ kHz, при этом

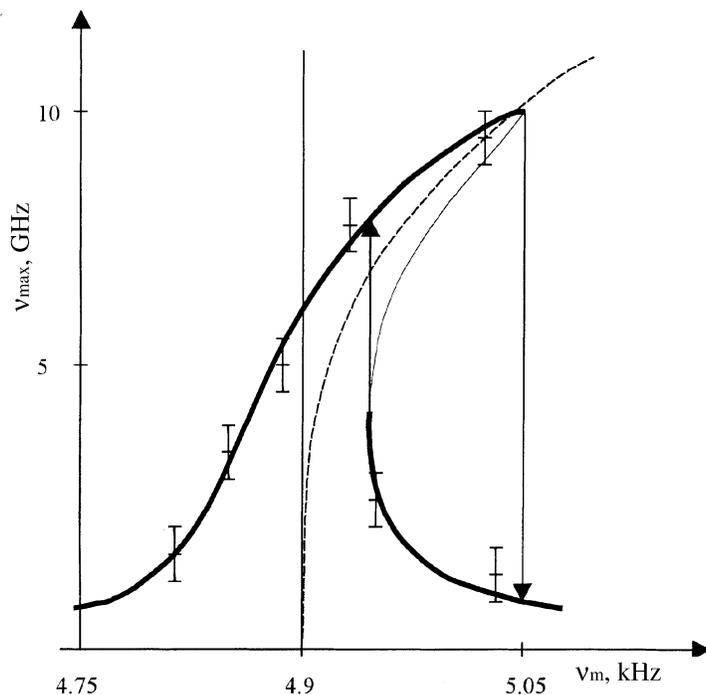


Рис. 3. Зависимость девиации мгновенной частоты от частоты приложенного переменного напряжения при $U_m = 150$ V.

в ненагруженном режиме, когда количество витков было около 10, добротность модулятора была 1000. На обкладки пьезокерамических преобразователей подавалось однополярное переменное напряжение с амплитудой $\cong 150$ V.

Когда лазерный источник находился в двухмодовом режиме генерации, на осциллограмме возникали симметричные выбросы (рис. 2), описываемые вторым членом в (2) и соответствующие частоте $\Delta\nu = 650$ MHz межмодовых биений. Расчет девиации мгновенной частоты, создаваемой фазовым модулятором, был такой же, как в [5], и, согласно (4), дал 10 GHz, что соответствует полному диапазону перестройки частоты источника 20 GHz.

В нашем случае величина девиации, как ранее было показано, ограничивалась диапазоном линейной зависимости упругих деформаций от амплитуды внешней вынуждающей силы.

Расчет величины Ω_{\max} при условии $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$; $\sigma_{elas.} \cong 100 \text{ МПа}$; $E = 120 \text{ ГПа}$; $\lambda = 0.63 \text{ }\mu\text{m}$; $n = 1.45$; $N = 1000$ дает $\Omega_{\max}/2\pi \cong 9.4 \text{ GHz}$, что согласуется с полученным на эксперименте значением.

По мере увеличения амплитуды колебаний при $\sigma \geq \sigma_{elas.}$ существенную роль начинает играть ангармонизм возвращающей силы, что сказывается на появлении нелинейной зависимости между частотой резонанса и амплитудой вынуждающей силы, в итоге резонансная кривая становится изогнутой, типичной для нелинейного осциллятора. На рис. 3 приведен характерный вид резонансной кривой в режиме колебаний с конечной амплитудой. Наблюдаемая расстройка в нашем случае составляла $\cong 150 \text{ Hz}$.

Оценка переданной мощности P из формулы (11), соответствующей диапазону девиации мгновенной частоты $\Delta\nu = 10 \text{ GHz}$, дала $P \cong 12 \text{ W}$. Однако на эксперименте мы не наблюдали нагрев резонатора. Тщательный анализ потерь показал, что добротность резонатора в основном определяется сопротивлением реакции излучения звука колебательной системой в окружающее пространство.

По нашему мнению, использование термически обработанного материала из бериллиевой бронзы позволит повысить диапазон девиации мгновенной частоты до 100 GHz (соответственно диапазон перестройки 200 GHz) при числе витков 1000 , что сравним с диапазоном перестройки динамически одночастотных полупроводниковых лазеров.

Список литературы

- [1] *Oberson P., Huttner B., Gisin N.* // Opt. Lett. 1999. V. 24. P. 451–453.
- [2] *Barfuss H., Brinkmayer E.* // J. Lightwave Technol. 1989. V. 7. P. 3–10.
- [3] *Miguel V. Andres.* // Meas. Sci. Technol. 1992. V. 3. P. 217–221.
- [4] *Tsuji K., Shimizu K., Horiguchi T., Koyamada Y.* // IEEE Photon. Technol. Lett. 1995. V. 7. P. 804.
- [5] *Потапов В.Т., Мамедов А.М., Седых Д.А., Шаталин С.В.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 16. С. 13–17.
- [6] *Беляев Н.М.* Сопротивление материалов. М.: Гостехиздат, 1962. 856 с.
- [7] *Пастухова Ж.П., Рахматдт А.Г.* Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1983. 364 с.