

УДК 621.373.826

*Н. А. МАМЕДОВА, И. А. СУХОИВАНОВ*, канд. техн. наук,  
*И. В. ШЕРБАТКО*

**ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ С ВНЕШНЕЙ  
МОДУЛЯЦИЕЙ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ  
СВЧ-ПОДНЕСУЩЕЙ**

---

Успешные лабораторные исследования и разработки быстродействующих компонентов волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) на основе внешней модуляции оптического излучения

позволили отечественной промышленности освоить серийный выпуск таких элементов. Благодаря этому появилась возможность создания ВОЛП с повышенными, по сравнению с приборами на внутренней модуляции, техническими характеристиками.

Целью работы является исследование серийных интегрально-оптических компонентов на основе внешней модуляции в контексте их применения в быстродействующих аналоговых ВОЛП. Для этого рассмотрим основные параметры интегрально-оптических модуляторов (ИОМ) интенсивности, которые получили наибольшее распространение. Такими параметрами являются: быстродействие, линейность, вносимое оптическое затухание и динамический диапазон.

Быстродействие интегрально-оптических модуляторов и переключателей на  $\text{LiNbO}_3$  ограничивается в первую очередь различием фазовых скоростей оптической и СВЧ волн. Использование электродов специальной топологии позволяет компенсировать это фазовое рассогласование, но приводит к увеличению управляющего напряжения и мощности модулирующего сигнала.

В работе [1] обсуждаются результаты исследования предложенного волноводного ИОМ с прерывистым «накапливающимся» взаимодействием, реализованного на кристалле ниобата лития  $Y$ -среза в виде структуры, в которой оптический волновод выводится при помощи изгибов из межэлектродной области и через определенный промежуток длины возвращается обратно. Показано, что в случае пренебрежения затуханием СВЧ волны использование прерывистого накопления взаимодействия дает в области частот 13—15 ГГц примерно двукратный выигрыш в управляющем напряжении, однако, эти данные требуют более тщательной экспериментальной проверки.

Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ИОМ типа бегущей волны имеет характер  $\sin(x)/x$  и поэтому выравнивание частотной характеристики является достаточно актуальной задачей. Важным параметром ИОМ является также оптическое затухание, которое состоит из трех компонентов: френелевских потерь на отражение, потерь излучения в материале ИОМ и потерь на ввод и вывод оптической мощности. Величина потерь зависит от вида и конструкции ИОМ, типа применяемого лазера. Типичные значения потерь для ИОМ интенсивности — 8—15 дБ. Остается достаточно сложной проблема сопряжения волоконного световода (ВС) с волноводом ИОМ. Увеличение поперечных размеров оптического волновода для оптимизации сопряжения с ВС приводит к уменьшению максимальной эффективности модуляции, поэтому здесь должен быть достигнут разумный компромисс [2].

Рассмотрим основные этапы расчета ВОЛП СВЧ на основе ИОМ. Коэффициент передачи по мощности от входа модулятора до выхода фотодетектора определяется выражением

$$K_m = (1 - |\Gamma|^2) R_n R_n (P_0 \alpha_m \alpha S / 2U_{\lambda/2})^2, \quad (1)$$

где  $U_{\lambda/2}$  — полуволновое напряжение модулятора;  $P_0$  — выходная мощность лазера;  $\alpha_m$  — суммарный коэффициент потерь оптической мощности в модуляторе;  $\alpha$  — оптические потери в компонентах ВОЛП;  $S$  — чувствительность фотодетектора;  $R_{\text{в}}$  и  $R_{\text{н}}$  — сопротивления источника СВЧ сигнала и нагрузки соответственно;  $\Gamma$  — коэффициент отражения СВЧ волны от входа модулятора

Динамический диапазон находится между нижним пределом, когда амплитуда сигнала эквивалента шумовому уровню, и верхним пределом, когда уровень гармоник не превышает уровень шума. Для получения максимальной линейности рабочую точку в модуляторах интерференционного типа выбирают на линейном участке. Динамический диапазон расширяется при увеличении интенсивности оптического излучения и уменьшении шумов системы.

Нелинейность наиболее распространенного ИОМ типа Маха — Цендера вызвана сложным законом изменения интенсивности выходной мощности  $I$  от прикладываемого напряжения  $U$ :

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi U}{2U_{\lambda/2}} - \frac{\Phi}{2} \right),$$

где  $I_0$  — входная оптическая емкость;  $\Phi$  — статический угол смещения. Если мы представим  $U$  в виде  $U = U_0 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)$  (3), то результирующий сигнал не будет содержать составляющих первого порядка [4]. Искажения на выходе фотодетектора при глубине модуляции  $m$ , вызванные генерацией гармоник даются выражением

$$D_{\text{гарм}} = 20 \lg \frac{m^2 \pi^2}{96 - 9m^2 \pi^2}, \quad (4)$$

а искажения вызванные третьей интермодуляционной составляющей (ИМС):

$$D_{\text{ИМС}} = 20 \lg \frac{m^2 \pi^2}{32 - 3m^2 \pi^2}. \quad (5)$$

В работе [3] рассмотрен вопрос оптимизации положения рабочей точки на модуляционной характеристике (МХ) для получения максимального динамического диапазона ИОМ типа Маха — Цендера. Достигнуты значения в 65 и 54 дБ в узких полосах пропускания — 1 и 20 кГц соответственно.

Одним из методов линеаризации МХ является совмещение двух или нескольких модуляторов, МХ которых соответствует членам разложения в ряд Фурье линейной (линейно-периодической) функции. Однако создание многосекционных модуляторов увеличивает оптические потери и усложняет конструкцию устройства.

Энергетическим параметром ИОМ является потребляемая мощность, удобным выражением которого является удельная мощность  $P/\Delta f$  (потребляемая мощность на единицу ширины полосы модулятора). Для эффективной работы модулятора необходимо обеспечить низкие потери СВЧ-мощности и оптимальное СВЧ-согласование источника сигнала с ИОМ. Характеристический импеданс структуры электродов определяет требуемую СВЧ-мощность возбуждения, а также влияет на ее потери. Из-за высокой диэлектрической проницаемости подложки и ограничений на отношение

ширины электродов к зазору между ними импеданс компланарного волновода (КПВ) в модуляторах на ниобате лития обычно значительно меньше 50 Ом, использование толстых электродов также приводит к снижению характеристического импеданса КПВ из-за увеличения емкости, а также к снижению его эффективной диэлектрической проницаемости вследствие увеличения доли энергии электромагнитной волны, находящейся над подложкой.

Омические потери в КПВ определяются в первую очередь сопротивлением металла, рабочей частотой и размерами зазоров между электродами, а также шероховатостью поверхности и отношением глубины скин-слоя к толщине электродов [2]. Влияние омических потерь на эффективность модуляции состоит в снижении пика АЧХ на величину, выраженную в децибелах, приблизительно равную корню квадратному из вносимых СВЧ потерь, также выраженных в децибелах. Мощность оптического излучения, поступающего на вход ИОМ, существенно ограничивается фото-рефрактивным эффектом, который вызывает частотную модуляцию оптической несущей, что в свою очередь приводит к искажениям передаваемого сигнала. Оптическое разрушение в ниобате лития является по большей части следствием ионизации примесных атомов железа в кристалле и может быть уменьшено за счет снижения концентрации примесей, уменьшения энергии падающих фотонов или увеличения фотопроводимости кристалла.

Несмотря на некоторые недостатки, ИОМ имеют потенциально большую широкополосность, чем приборы на внутренней модуляции. Поскольку такие модуляторы являются пассивными устройствами, они не увеличивают относительную шумовую интенсивность сигнала.

Работа модуляторов, рассмотренных до сих пор, основывалась на использовании линейного электрооптического эффекта. Однако имеются и модуляторы другого типа, электроабсорбционные, которые должны классифицироваться как электрооптические, так как для появления модуляции интенсивности излучения в них используется электрическое поле, но не применяется эффект Погкельса. Вместо этого в электроабсорбционных модуляторах используется эффект Франца-Келдыша. При подаче сильного электрического поля граница полосы собственного поглощения в полупроводниках смещается в сторону больших длин волн. Благодаря наличию резкой границы полосы поглощения у материалов с прямой запрещенной зоной, например GaAs, приложение электрического поля может привести к сильному изменению поглощения длин волн вблизи границы полосы. Так, для излучения с длиной волны 0,9 мкм при подаче электрического напряжения коэффициент поглощения увеличивается в пределах 25—1000 1/см.

Для исследования возможности построения ВОЛП СВЧ-поднесущей на серийных оптоэлектронных приборах с внешней модуляцией были выбраны интегрально-оптический модулятор-преобразователь МП-02-01 и монолитный интегрально-оптический элемент

(ИОЭ) П—01—1. Первый представляет собой модулятор на основе канальных волноводов в  $\text{LiNbO}_3$  типа Маха — Цендера, второй — структуру  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  с двумя изолированными полосковыми секциями, изготовленную по эпитаксиально-планарной технологии, включающей операции ионного травления. ИОМ МП—02—01 имеет встроенный излучатель 32ДЛ—105 с длиной волны 0,83 мкм и многомодовый ступенчатый световод на выходе. Полуволновое напряжение по основному входу составило 1,5 В, входная емкость на частоте 70 МГц — 31,5 пФ. Величина входной емкости определяет частотный диапазон ИОМ, который, как считается, для приборов статического типа не превышает 1—2 ГГц. Для повышения граничной частоты устройства необходимо решить задачу согласования источника СВЧ-сигнала с нагрузкой в выбранном частотном диапазоне. Наличие рассогласования приводит к отражению падающей на нагрузку мощности СВЧ-волны обратно в генератор. Комплексная величина коэффициента отражения записывается выражением

$$\Gamma = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0}, \quad (6)$$

где  $Z_n$  и  $Z_0$  — импедансы нагрузки и СВЧ-тракта соответственно. Отношение отраженной мощности СВЧ сигнала к падающей запишем как

$$\frac{\Delta P}{P} = |\Gamma|^2 = \left( \frac{K-1}{K+1} \right)^2, \quad (7)$$

где  $K$  — коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) в линии, характеризующий степень согласования источника сигнала и нагрузки.

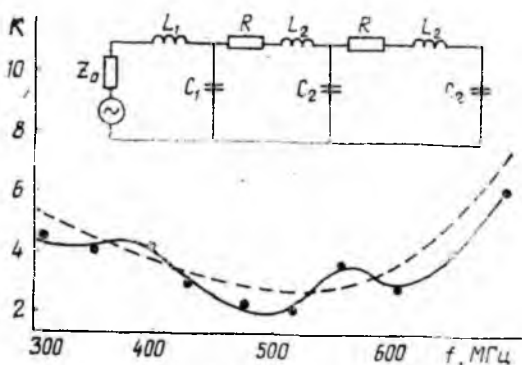


Рис. 1

Для синтеза согласующей цепи необходимо знать параметры нагрузки. С этой целью была предложена электрическая модель исследуемого ИОМ. На рис. 1 представлена электрическая эквивалентная схема модулятора, а также частотная зависимость КСВН экспериментального измерения (сплошная линия) и численной

модели (пунктирная линия). Элементы  $L_1$  и  $C_1$  соответствуют проводнику, соединяющему СВЧ-разъем с полосковыми электродами модулятора. Их значения вычислялись на основе геометрических размеров этого проводника. Значения элементов  $R$ ,  $L_2$  и  $C_2$  оптимизировались на ЭВМ путем сравнения частотной зависимости КСВН предложенной модели с экспериментальной зависимостью с учетом знака импеданса методом наименьших квадратов. Были получены следующие значения элементов:  $L_1 = 9,4$  нГн;  $L_2 = 11,2$  нГн;  $R = 14,5$  Ом;  $C_1 = 2,1$  пФ;  $C_2 = 14$  пФ.

Анализ схемы показывает, что значительный КСВН на частотах свыше 600 МГц связан прежде всего с большим значением индуктивного сопротивления подводящего проводника и электродов. В диапазоне 500—700 МГц реактивная составляющая импеданса ИОМ невелика, что позволяет применить стандартные методы трансформации активного сопротивления, например, с помощью четвертьволнового трансформатора. Главным недостатком такого способа согласования является узкополосность. Применение многоступенчатых трансформаторов и плавных переходов решает проблему узкополосности, однако в этом случае необходимо компенсировать значительную реактивную составляющую импеданса ИОМ в широком диапазоне. В процессе эксперимента узкополосное согласование достигалось также включением короткозамкнутого шлейфа регулируемой длины параллельно входу ИОМ, что позволило снизить КСВН элемента в частотном диапазоне 600—630 МГц до 1,18 и поднять на 4 дБ АЧХ передающего модуля в этой полосе. АЧХ ИОМ снималась при помощи быстродействующего фотоприемного модуля на основе лавинного фотодиода ЛФД-2, согласованного по выходному сопротивлению с усилителем сигнала. Малый уровень выходной оптической мощности ИОМ не позволил достаточно точно измерить уровень гармоник в выходном сигнале модулятора, так как оптические потери на ввод и вывод излучения из кристалла не компенсировались хорошей чувствительностью фотоприемника. Выходная оптическая мощность ИОМ не превышала 20 мкВт, что объясняется использованием в приборе многомодового гетеролазера, широкая диаграмма направленности которого не оптимизирована с входной апертурой волноводного канала модулятора. Незначительная выходная мощность данного прибора делает проблематичным его применение в ВОЛП СВЧ средних и больших длин.

При исследовании ИОЭ П—01—1 особое внимание уделялось нелинейности зависимости выходной мощности от напряжения на сигнальном электроде прибора, так как он разрабатывался непосредственно для высокоскоростных цифровых ВОЛП. Измерения показали, что при определенных токах на основном (питающем) и напряжениях на сигнальных электродах, среди семейства кривых данной зависимости имеется линейный участок, позволяющий реализовать аналоговую модуляцию излучения (кривая 3 на рис. 2). Кривые 1, 2, 3 и 4 отвечают токам основного электрода в 80, 72, 65 и 53 мА соответственно.

Значительным преимуществом рассмотренных приборов перед приборами на токовой модуляции является потенциальное управление. Незначительные управляющие токи (в данном случае сигнальный ток не превышал 10 мА при максимальной глубине линейной модуляции 70 %) позволяют упростить схемы управления

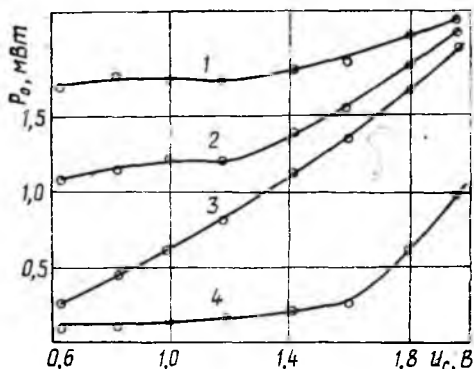


Рис. 2

оптическим излучением передающих модулей, уменьшить эффект динамического уширения спектра излучения (чирпинг), присущего многим приборам на внутренней модуляции и улучшить тепловой режим прибора.

Для исследования АЧХ ИЭО была собрана схема, позволяющая работать в линейном режиме. Высокочастотный сигнал через развязку по питанию поступал на сигнальный вход

прибора и вызывал модуляцию выходного излучения. Нелинейность АЧХ ИЭО в частотном диапазоне 300—800 МГц не превышала 4,5 дБ, мощность постоянной составляющей оптического сигнала была не менее 1,5 мВт, отношение сигнал-шум во всей полосе было не меньше 30 дБ, уровень второй гармоники не ниже — 20 дБ при глубине модуляции около 40 %. Данные характеристики позволяют судить о возможности реализации на основе ИЭО аналоговой ВОЛП дециметрового диапазона.

Таким образом, в работе приведена методика расчета основных характеристик оптоэлектронных приборов на основе внешней модуляции излучения в контексте их использования в ВОЛП СВЧ-поднесущей и проведены экспериментальные работы, показывающие возможность использования выпускаемых серийно устройств для создания таких линий.

**Список литературы:** 1. Буачидзе З. Э., Морозов В. Н. Волноводный электрооптический модулятор с граничной частотой более 10 ГГц // Квант. электроника. 1988. Т. 15, № 7. С. 1429—1432. 2. Бахрах Л. Д., Блискивицкий А. А. Применение лазеров и волоконнооптических систем для управления формированием СВЧ-сигналов и их распределения в антенных решетках // Квант. электроника. 1988. Т. 15, № 5. С. 879—914. 3. Багликов В. Б., Долинин Р. Ю. Исследование датчика электрического поля на основе интегрально-оптического модулятора Маха—Цандера // Квант. электроника. 1988. Т. 15, № 10. С. 2155—2158. 4. Stephens W. E. // J. Lightwave Technol. 1987. Vol. LT-5, № 3. P. 380—387.

Поступила в редакцию 27.06.90