

Моделирование датчика на основе оптоэлектронного генератора для прецизионных измерений оптико-физических параметров различных сред

А. В. ЛОПАРЕВ, М. Е. БЕЛКИН

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Москва, Россия, e-mail: alexey_loparev@mail.ru

Предложена и исследована методом медленноменяющихся амплитуд полная модель функционирования оптоэлектронного генератора ВЧ- и СВЧ-диапазонов в переходном и стационарном режимах работы. Эффективность применения данного генератора для измерения оптико-физических параметров различных сред рассмотрена на примере его использования для определения длины и показателя преломления интегрального волновода.

Ключевые слова: СВЧ-оптоэлектроника, оптоэлектронный генератор СВЧ-сигналов, оптико-физические параметры.

The full functioning model of optoelectronic HF and SHF ranges is proposed and studied by slowly varying amplitudes method for transitional and stationary working regimes. The application effectivity of this generator for different media optophysical parameters measurement is considered. The length and refraction coefficient of integral waveguide measurements are used as an example.

Key words: SHF-optoelectronics, SHF-signals optoelectronic generator, optophysical parameters.

В последние годы в результате интеграции фотоники и СВЧ-радиоэлектроники сформировалось новое междисциплинарное направление — СВЧ-оптоэлектроника [1]. В рамках данного направления широкое развитие получили так называемые активные оптоэлектронные интегральные схемы (ОЭИС) [2] в монолитном либо гибридном исполнении на базе активных оптоэлектронных компонентов и пассивных интегрально-оптических волноводов. Применение последних обуславливает актуальность создания точных приборов контроля их основных оптико-физических параметров, например, оптической длины и показателя преломления.

Как известно, для контроля оптико-физических параметров сред, в частности, потерь в волноводных структурах традиционно применяют методы типа «светящегося конца» или с использованием призматического элемента связи [3]. С их помощью по результатам измерения общего затухания и обладая априорной информацией о погонном коэффициенте затухания изучаемой волноводной структуры на единицу ее длины, можно определить длину прямого участка этой структуры. Однако для более сложной структуры данные методы измерения будут некорректны из-за невозможности учета дополнительных потерь, связанных с изгибами и ответвлениями интегрального волновода.

Кроме того, для прецизионного контроля оптико-физических параметров волноводных структур используют интерференционные методы. Так, задача измерения длины волновода может быть решена при помощи интерферометра Майкельсона с модуляцией фазы в опорном плече, а задача измерения показателя преломления — при помощи интерференционного микроскопа [4]. Однако применение сложных интерферометрических методов для исследования параметров интегрально-оптических волноводов имеет ряд

ограничений. Например, при измерении длины волновода основной проблемой является эффективный ввод лазерного излучения в изучаемую структуру. В свою очередь, измерение показателя преломления возможно лишь при отсутствии оптически непрозрачных покрытий на верхней поверхности волновода, что, как правило, нереально для ОЭИС. В общем, данные методы больше подходят для хорошо оборудованной оптической лаборатории и мало пригодны при разработке и исследовании ОЭИС.

Для преодоления этих ограничений предлагаем более эффективный метод измерения оптико-физических параметров сред с использованием в качестве излучателя и приемника тестового сигнала оптоэлектронного генератора (ОЭГ). Данное устройство активно исследуется в последние годы в основном для телекоммуникационных применений [5], однако его применение для измерительных целей еще недостаточно изучено. Так, была найдена только одна публикация в материалах международной конференции, посвященная данной тематике [6]. Кроме того, вследствие несовместимости традиционных аналитических подходов в радиочастотном и оптическом диапазонах в настоящее время отсутствует корректная модель функционирования ОЭГ в различных режимах его работы. Указанная выше теоретическая проблема была решена с использованием так называемого единого волнового подхода [7] на основе всесторонне развитых методов теории СВЧ радиотехнических цепей. Однако здесь была изучена работа ОЭГ только в стационарном режиме.

В свете изложенного в данной статье предложена и исследована полная модель функционирования ОЭГ в переходном и стационарном режимах работы. Эффективность

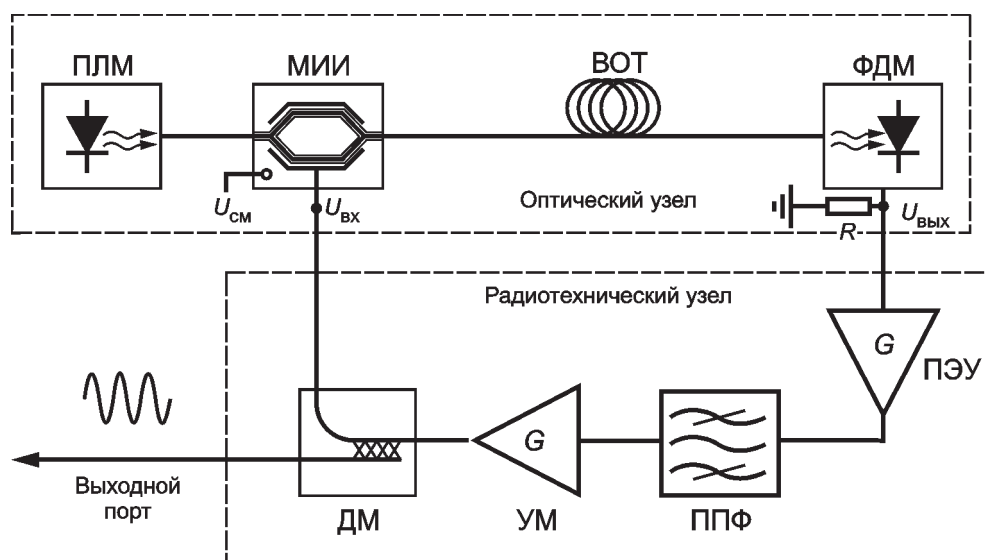


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронного генератора:

ПЛМ — полупроводниковый лазерный модуль; МИИ — модулятор интенсивности излучения; ВОТ — волоконно-оптический тракт; ФДМ — фотодиодный модуль; ПЭУ — предварительный электрический усилитель; ППФ — полосно-пропускающий фильтр; УМ — усилитель мощности; ДМ — делитель мощности

применения ОЭГ для измерения оптико-физических параметров различных сред передачи рассмотрена на примере его использования для измерения длины и (или) показателя преломления интегрального волновода.

Принцип работы оптоэлектронного генератора. Рассмотрим типичную структурную схему ОЭГ, приведенную на рис. 1 и включающую оптический и радиотехнический узлы [5]. В состав оптического узла входят полупроводниковый лазерный модуль ПЛМ, модулятор интенсивности излучения МИИ, волоконно-оптический тракт ВОТ и фотодиодный модуль ФДМ, а в состав радиотехнического узла — предварительный электрический усилитель ПЭУ, полосно-пропускающий фильтр ППФ, усилитель УМ и делитель ДМ мощности. Принцип действия ОЭГ состоит в следующем. Непрерывное излучение ПЛМ, являющегося источником электромагнитной энергии, поступает на вход МИИ, в качестве которого обычно служит электрооптический модулятор бегущей волны на основе интегрального интерферометра Маха—Цандера. Далее модулированное СВЧ-сигналом оптическое излучение задерживается в ВОТ и поступает на вход ФДМ, в котором происходит его демодуляция. Демодулированный СВЧ-сигнал предварительно усиливается при помощи ПЭУ. Высокодобротный ППФ задает частоту генерации ОЭГ и подавляет СВЧ-колебания на других частотах. После усиления в УМ СВЧ-сигнал поступает на вход ДМ, с выхода которого часть сигнала направляется в выходной порт ОЭГ, а другая часть — на управляющий вход МИИ, замыкая тем самым цепь положительной обратной связи.

Процесс самовозбуждения ОЭГ вызван флуктуациями в элементах его схемы, например, флуктуацией интенсивности излучения лазера, дробовым шумом на выходе фотодиода, тепловым шумом в электронных элементах. Как и в любом автогенераторе, при переходе к стационарному режиму работы в ОЭГ возникает экспоненциальное нарастание амплитуды колебаний, что обусловлено положительной обратной связью цепи. Однако с увеличением амплитуды ко-

лебаний все больше сказывается ее нелинейность, в результате чего общий коэффициент усиления ОЭГ уменьшается, и автогенератор переходит в стационарный режим работы.

Стационарный режим достигается усилением в ПЭУ и УМ, компенсирующим потери при электрооптическом преобразовании в МИИ, а также соответствием времени задержки сигнала в цепи обратной связи набегу фаз, кратному 2π [7].

Из теории автоколебаний известно, что для обеспечения режима самовозбуждения необходимо наличие в схеме нелинейного элемента. В схеме ОЭГ (см. рис. 1) таким нелинейным элементом является МИИ. Для определенности рассмотрим в качестве МИИ идеальный электрооптический модулятор бегущей волны на основе интегрального интерферометра Маха—Цандера, выполненного на кристалле ниобата лития (LiNbO_3) [8, 9], в котором коэффициенты пропускания плеч интерферометра одинаковые, а коэффициент деления мощности в Y-разветвителях равен 0,5. В этом случае коэффициент передачи МИИ в зависимости от переменного напряжения $U_{\text{упр}}$ на его входе [7]:

$$K(U_{\text{упр}}) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{\pi U_{\text{упр}}}{U_{\pi}} + \Phi_n \right) \right), \quad (1)$$

где U_{π} — так называемое полуволновое напряжение, при котором разность фаз волн, распространяющихся в плечах интерферометра, равна π ; Φ_n — разность фаз в плечах в отсутствие управляющего напряжения.

Как следует из (1), коэффициент передачи рассматриваемого МИИ является периодической функцией $U_{\text{упр}}$. Отметим, что для уменьшения нелинейных искажений в данном случае рабочий режим модулятора обеспечивается дополнительной подачей на электроды модулятора постоянного напряжения смещения $U_{\text{см}}$, примерно равного $0,5U_{\pi}$.

Модель ОЭГ в переходном и стационарном режимах генерации. Процессы, происходящие в автоколебательных системах, описываются, как известно [10], нелинейными дифференциальными уравнениями. Так, для исследования процессов возбуждения СВЧ-генераторов используется уравнение Кирхгофа в дифференциальной форме, учитывающее только переменные составляющие токов и напряжений в схеме генератора. Так как точных аналитических решений нелинейных дифференциальных уравнений не существует, для СВЧ-генераторов были разработаны следующие критерии устойчивости: критерий Рауса—Гурвица, графоаналитический критерий Михайлова и критерий Найквиста [10].

Перечисленные выше критерии не могут быть использованы для анализа условий самовозбуждения ОЭГ, так как в его состав входит оптический узел, к которому не применимы понятия напряжения и тока для описания процесса пере-

дачи энергии. Однако универсальность теории электромагнитного поля позволяет применить в ходе анализа режима самовозбуждения ОЭГ подход, который заключается в замене системы ПЛМ—МИИ—ВОТ—ФДМ (см. рис. 1) эквивалентным элементом, осуществляющим нелинейное инерционное преобразование напряжений. Обозначим переменное напряжение на сопротивлении нагрузки фотодетектора $U_{\text{вх}}$, а переменное напряжение, поступающее на управляющий вход модулятора, $U_{\text{вх}}$.

Время запаздывания $U_{\text{вх}}$ относительно $U_{\text{вх}}$ преимущественно определяется временем Δt задержки в волокне, поскольку на практике оно много больше времени задержки других элементов ОЭГ:

$$\Delta t = nl / c, \quad (2)$$

где n — групповой показатель преломления оптического волокна (для кварцевого стекла $n = 1,45$); l — общая длина ВОТ; c — скорость света в вакууме. Напряжение на нагрузке фотодетектора будет определяться во временной области следующим образом:

$$U_{\text{вх}}(t) = \alpha K(U(t - \Delta t)), \quad (3)$$

где $K(U(t - \Delta t))$ — функция передачи МИИ, охваченного петлей обратной связи; α — коэффициент передачи оптического узла ОЭГ [7, 11],

$$\alpha = P_{\text{л}} K_{\text{оп}} S_{\text{л}} R_{\text{н.фд}} N_1 10^{-L_b/10} N_2 K_{\text{эоп}},$$

где $P_{\text{л}}$ — мощность излучения ПЛМ; $K_{\text{оп}}$ — коэффициент передачи оптического сигнала в МИИ; $S_{\text{л}}$ — токовая чувствительность фотодиода; $R_{\text{н.фд}}$ — сопротивление нагрузки фотодиода; N_1 — эффективность ввода излучения в ВОТ; L_b — погонные оптические потери ВОТ; N_2 — эффективность ввода в ФДМ; $K_{\text{эоп}}$ — эффективность электрооптического преобразования в МИИ. Для упрощения дальнейшего рассмотрения примем $\alpha = \text{const}$.

Приняв во внимание (1), запишем уравнение (3) в следующем виде:

$$U_{\text{вх}}(t) = \frac{\alpha}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi(U_{\text{вх}}(t - \Delta t) - U_{\text{р.т.}})}{U_{\pi}} + \Phi_{\text{н}} \right) \right]. \quad (4)$$

Предположим, что в качестве ППФ используется фильтр LC-типа, поэтому связь между напряжениями на его входе и выходе во временной области будет выражаться дифференциальным уравнением второго порядка. Запишем выражение для напряжения на выходе ПЭУ

$$U_{\text{вхПЭУ}} = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt + Ri(t), \quad (5)$$

где L — индуктивность; C , R — емкость и сопротивление нагрузки ППФ; $i(t)$ — ток, протекающий через сопротивление нагрузки.

Заменив в (5) ток $i(t) = U_{\text{вх}}(t)/R$, $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} G_{\text{ум}} K_{\text{п.дел}} K_{\text{дел}}$ и $U_{\text{вх}} = U_{\text{вхПЭУ}} / G_{\text{пэу}}$, а также объединив его с (4), получим

$$L \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int U_{\text{вх}}(t) dt + RU_{\text{вх}}(t) = R\alpha\beta \left[1 + \cos \left(\frac{\pi(U_{\text{вх}}(t - \Delta t) - U_{\text{см}})}{U_{\pi}} + \Phi_{\text{н}} \right) \right], \quad (6)$$

где $\beta = K_{\text{ппф}} G_{\text{пэу}} G_{\text{ум}} K_{\text{п.дел}}$ — коэффициент передачи радиотехнического узла, $K_{\text{ппф}}$ — коэффициент передачи ППФ в его полосе пропускания, $G_{\text{пэу}}$ — коэффициент усиления ПЭУ, $G_{\text{ум}}$ — коэффициент усиления УМ, $K_{\text{п.дел}}$ — коэффициент передачи ДМ. Отметим, что произведение $\alpha\beta$ определяет коэффициент передачи по разомкнутой петле ОЭГ.

Продифференцировав по времени (6), получим дифференциальное уравнение ОЭГ

$$L \frac{d^2 U_{\text{вх}}(t)}{dt^2} + R \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt} + \frac{U_{\text{вх}}(t)}{C} = -\frac{R\alpha\beta\pi}{U_{\pi}} \sin \left(\frac{\pi(U_{\text{вх}}(t - \Delta t) - U_{\text{см}})}{U_{\pi}} + \Phi_{\text{н}} \right) \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}.$$

Это уравнение является нелинейным, поскольку коэффициент при $dU_{\text{вх}}/dt$ зависит от искомой переменной $U_{\text{вх}}(t) = U(t)$. Нелинейность дифференциального уравнения является следствием присутствия в схеме ОЭГ нелинейного элемента МИИ. Отметим, что правая часть (7), представляющая собой производную коэффициента передачи по времени, является крутизной модуляционной характеристики ОЭГ.

Если перенести в правую часть (7) член, содержащий первую производную $U_{\text{вх}}(t)$, и ввести новую переменную

$$S(U) = -\frac{\alpha\beta\pi}{U_{\pi}} \sin \left(\frac{\pi(U(t - \Delta t) - U_{\text{см}})}{U_{\pi}} + \Phi_{\text{н}} \right), \quad \text{то (7) примет вид}$$

$$U''(t) + 1/[(LC)U(t)] = -[R(1 - S(U(t)))/L]U'(t). \quad (8)$$

Аналитического решения уравнения (8) в общем виде не существует. Оно может быть решено либо введением некоторых допущений и приближений, либо численно, например, методом конечных разностей.

Ранее было получено аналитическое решение (8) методом медленноменяющихся амплитуд [11]. Данный метод традиционно применяется для анализа СВЧ-генераторов и использует допущение близости возникающих колебаний по форме к гармоническим [10]:

$$U(t) = A(t) \cos(\omega t - \varphi(t)), \quad (9)$$

где $A(t)$ — амплитуда колебаний; $\omega = 1/(2\pi(LC)^{0.5})$ — частота генерируемых колебаний; $\varphi(t)$ — фаза колебаний.

Заменив скорости изменения амплитуды и фазы в пределах периода колебаний средними скоростями, при вы-

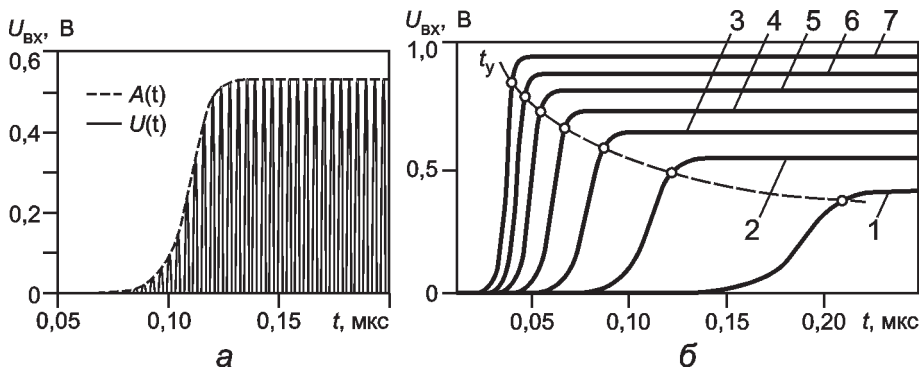


Рис. 2. Процесс самовозбуждения и нарастания амплитуды колебаний ОЭГ (а), зависимость амплитуды $A(t)$ на управляющем входе МИИ при значениях β , изменяющихся от 39,875 (кривая 1) до 40,625 (кривая 7) с шагом 0,125 (б)

полнении неравенства $|U(t) - U_{cm}| < U_{\pi} / \pi$, решим уравнение (8) относительно $A(t)$ следующим образом [11]:

$$A(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{C \exp(-\gamma t) + 1}}, \quad (10)$$

где $\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2(\omega \Delta t) \right) \frac{|\tilde{S}_2|}{\tilde{S}_0 - 1}$; $\gamma = \frac{R}{L} (\tilde{S}_0 - 1)$; C — постоянная,

значение которой определяется начальными условиями флуктуаций напряжения на управляющем входе МИИ, $C = (\sigma A^2(0))^{-1} - 1$, $A(0)$ — амплитуда шумов ОЭГ в момент времени $t = 0$, соответствующий моменту подачи постоянного напряжения смещения на управляющий вход МИИ; $\tilde{S}_0 =$

$$= \frac{\alpha \pi \beta}{U_{\pi}} \left[\frac{\pi}{U_{\pi}} U_{cm} - \sin(\Phi_n) + \frac{\pi^2}{2U_{\pi}^2} \sin(\Phi_n) U_{cm}^2 \right], \quad \tilde{S}_2 = \frac{\alpha \pi^3 \beta}{2U_{\pi}^3} \sin(\Phi_n).$$

Отметим, что в рассматриваемом случае $\tilde{S}_0$ и $\tilde{S}_2$ — константы.

Из (10) следует, что $A(\infty) = 1/\sqrt{\sigma}$ при $\gamma > 0$ и $A(\infty) = 0$ при $\gamma < 0$. Таким образом, условие самовозбуждения ОЭГ выполняется при $\gamma > 0$.

Для подтверждения корректности описанной выше модели рассчитаем показатели режима установления частоты ОЭГ, приняв следующие типичные значения параметров элементов схемы: $U_{\pi} = 5,5$ В, $U_{cm} = 3$ В, $\Phi_n = -22^\circ$, $C = 2,35$ пФ, $L = 1,6$ нГн, $R = 50$ Ом, $P_n = 10$ мВт, $S_f = 0,5$ А/Вт, $R_{н.фд} = 50$ Ом, $N_1 = N_2 = -0,3$ дБ, $l = 5$ км, $L_b = 1$ дБ/км, $K_{оп} = -7$ дБ, $K_{ЭОП} = -50$ дБ, $K_{ппф} = -5$ дБ, $G_{пзу} = 46$ дБ, $G_{ум} = 18$ дБ, $K_{п.дел} = -0,5$ дБ, $A(0) = 10^{-6}$ В.

На рис. 2, а показан процесс генерации колебаний и нарастания их амплитуды $A(t)$ во времени на управляющем входе МИИ. Для рассмотренного примера ОЭГ амплитуда колебаний напряжения на управляющем входе МИИ в стационарном режиме работы составила 0,53 В, а частота генерации 2,6 ГГц.

Исследуем время установления стационарного режима генерации ОЭГ t_y , определив его как время, в течение ко-

торого амплитуда колебаний напряжения $A_y = A(t_y)$ достигает 0,9 амплитуды стационарных колебаний $A(\infty)$:

$$A_y = 0,9 A(\infty) = 0,9 / \sqrt{\sigma}.$$

Заменив в (10) t на t_y , получим выражение, определяющее время установления стационарного режима работы ОЭГ:

$$t_y = -\gamma^{-1} \ln(0,23 / C).$$

На рис. 2, б приведено семейство огибающих амплитуды $A(t)$ колебаний в переходном режиме ОЭГ при коэффициенте передачи β радиотехнического узла, изменяющемся от 39,875 (кривая 1) до 40,625 (кривая 7) с шагом 0,125. Время t_y установления стационарного режима работы показано пунктирной линией. Как следует из рис. 2, б, коэффициент β определяет не только амплитуду колебаний в стационарном режиме, но и время его установления, которое, в свою очередь, является интегральным параметром — временем задержки ВОТ и крутизны нарастания амплитуды колебаний.

Для оценки корректности разработанной модели сопоставим результаты приведенного выше расчета с данными, полученными по известной более простой модели, разработанной для описания стационарного режима работы ОЭГ в квазилинейном приближении [8]. Результаты сравнения в виде зависимости нормированной на U_{π} амплитуды стационарных колебаний на входе МИИ от коэффициента передачи по разомкнутой петле (в данном случае он соответствует $\alpha\beta$) представлены на рис. 3, на котором линией 1 показаны результаты расчета по предложенной модели, линией 2 по известной [8] модели с линейной аппроксимацией коэффициента передачи МИИ и линией 3 по известной [8] модели с учетом пяти первых членов разложения коэффициента передачи в ряд Тейлора. Как следует из рис. 3, ход кривых в целом совпадает, что свидетельствует о корректности предложенной модели. В частности, наблюдается совпадение при значениях $\alpha\beta$, близких к 1, пока справедливо сделанное в [8] допущение, что амплитуда установившихся колебаний значительно меньше U_{π} . При дальнейшем увеличении $U_{вх}$ известная модель становится некорректной, при этом расхождение кривых достигает 10—15 %. Сделанные выводы подтверждаются результатами расчета [8] с учетом нелинейности коэффициента передачи МИИ (см. линию 3 на рис. 3), что выражается в уменьшении погрешности при больших значениях $U_{вх}$.

Оптоэлектронный генератор в качестве датчика оптико-физических параметров оптических волноводов. Рассмотрим применение описанного выше ОЭГ для исследования оптико-физических параметров сред на конкретном примере измерения длины и группового показателя преломления интегрального кремниевых волновода на кварцевой подложке, которые широко используются при создании так называемых планарных гибридных ОЭИС [12].

Принцип измерения длины оптического интегрального волновода при помощи ОЭГ заключается в следующем. С учетом принятого в модели генератора приближения мало-

сти времени задержки структурных элементов по сравнению с временем задержки ВОТ и формулы (2) условие баланса фаз для ОЭГ будет определять эквидистантный ряд частот генерации

$$f_0 = k / \Delta t = ck / (nl), \quad (11)$$

где k — порядковый номер моды генерации ОЭГ. Нужная мода выделяется в схеме ОЭГ при помощи ППФ. Как следует из (11), при введении испытуемого волновода произойдет увеличение общей длины ВОТ, что вызовет уменьшение частоты генерации, которое может быть просто зарегистрировано при помощи подключенного к выходному порту ОЭГ анализатора спектра (см. рис. 1).

Определим сдвиг частоты генерации Δf , для чего воспользуемся стандартным параметром — областью свободной дисперсии (ОСД), которая в данном случае соответствует расстоянию между соседними модами ОЭГ. Из (11) при $k = 1$ найдем

$$\text{ОСД} = c / (nl). \quad (12)$$

Обозначим l_3 , n — длину и показатель преломления эталонного волокна, соответственно; dl , n_1 — соответственно длину и показатель преломления испытуемого оптического волновода. При помощи несложных вычислений на основе (11) и (12) можно определить

$$\Delta f = -f_0 \text{ОСД} n_1 dl / c. \quad (13)$$

Зная величину сдвига частоты и параметры ОЭГ, по (13) можно рассчитать длину интегрального волновода при известном показателе преломления его материала либо показатель преломления при известной длине. Отметим, что выражение (13) справедливо при условии $n_1 dl / (nl_3) \ll 1$, т. е. длина эталонного волокна должна быть много больше длины испытуемого объекта. Данное условие легко выполняется для волновода ОЭИС.

Определим пути повышения чувствительности рассматриваемого датчика, для чего преобразуем выражение для сдвига частоты генерации, подставив (12) в (13):

$$\Delta f = -f_0 n_1 dl / (nl_3). \quad (14)$$

Как следует из (14), для повышения чувствительности необходимо увеличивать частоту генерации ОЭГ и уменьшать длину эталонного волокна. Однако, как ясно из (11), частота ОЭГ также обратно пропорциональна длине волокна, т. е. данный параметр требует четкого определения в ходе подготовки к измерениям.

Отметим, что изменение длины эталонного волокна оказывает влияние не только на расстояние между модами ОЭГ (см. (12)), но и на его частотно-модулированные (ЧМ) шумы. Шумовая модель ОЭГ, основанная на широко известных формулах Лисона для генератора с обратной связью [13], подробно рассмотрена в [14]. Воспользуемся ее результатами.

На рис. 4 приведена зависимость относительной мощности ЧМ-шумов S (сплошная линия) на расстоянии 10 кГц от несущей [14] и расстояния между соседними частотами (пунктирная линия) в спектре ОЭГ (см. (12)) от длины l_3 эталонного волокна. Шумовая характеристика была рассчита-

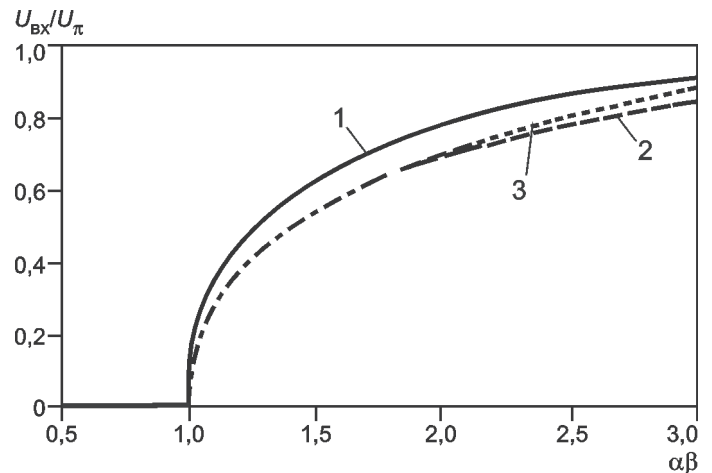


Рис. 3. Сравнение зависимости нормированной амплитуды стационарных колебаний от коэффициента прямой передачи разработанной модели ОЭГ (кривая 1) и известной модели [8] (кривые 2, 3)

на для следующих типичных значений параметров ОЭГ: коэффициент шума ПЭУ 3 дБ, $T = 300$ К, сила тока ФДМ 5 мА, уровень относительного шума интенсивности ПЛМ -140 дБ/Гц, суммарный коэффициент усиления напряжения ПЭУ и УМ 30 дБ, выходная мощность ОЭГ 10 мВт. Как следует из рис. 4, при увеличении длины эталонного волокна одновременно уменьшаются мощность ЧМ-шумов и расстояние между частотами в спектре ОЭГ.

Таким образом, данный параметр ОЭГ является результатом компромиссного выбора, зависящего от оптико-физических параметров объекта исследований, поскольку увеличение шумов приводит к ухудшению разрешающей способности измерений, а сокращение ОСД — к уменьшению диапазона измерения длины или показателя преломления.

В заключение рассмотрим конкретный пример измерения при помощи ОЭГ длины описанного выше кремниев

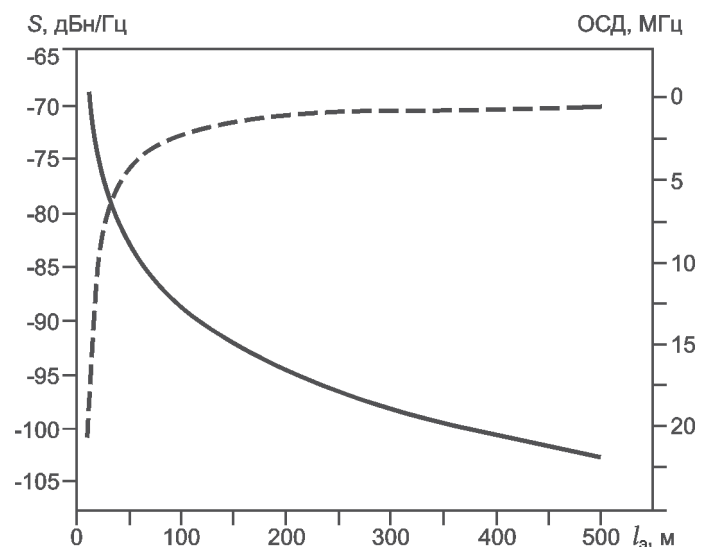


Рис. 4. Зависимость частотно-модулированных шумов (сплошная линия) и области свободной дисперсии (пунктирная линия) от длины эталонного волокна

волновода. Предположим, что ПЛМ работает в одночастотном режиме на волне вблизи 1,55 мкм (третье окно прозрачности кварцевого световода). При этом показатель преломления кремниевое волновода $n_1 = 3,48$. Также будем считать, что характерная длина интегрального волновода гибридной ОЭИС составляет порядка 1 мм.

Прежде всего, выберем длину эталонного оптического волокна. Согласно рис. 4 при $l_3 = 100$ м уровень ЧМ-шумов на расстоянии 10 кГц от несущей составляет -90 дБн/Гц, что обеспечивает высокое разрешение измерительной установки. При этом согласно (12) ОСД = 2,07 МГц. Предположим, что ППФ настроен на моду с $k = 1000$. Тогда $f_0 = 2,07$ ГГц. Рассчитав по (13) либо (14) сдвиг частоты генерации при $d/l = 1$ мм, получим $\Delta f = 49,7$ кГц. Следовательно, чувствительность ОЭГ частотой 2 ГГц при измерении длины оптического интегрального волновода составляет примерно 50 кГц/мм, что легко различить при помощи современного радиочастотного анализатора спектра.

Результаты и выводы. Предложена и исследована методом медленноменяющихся амплитуд полная модель функционирования оптоэлектронного генератора ВЧ- и СВЧ-диапазонов в переходном и стационарном режимах работы. Для оценки корректности разработанной модели результаты моделирования сопоставлены с данными известной более простой модели, созданной для описания стационарного режима работы ОЭГ в квазилинейном приближении. Сравнение показало, что ход зависимости амплитуды установившихся колебаний $U_{вх}$ от коэффициента передачи по разомкнутой петле $\alpha\beta$ в целом совпадает, это свидетельствует о корректности предложенной модели. В частности, наблюдается близкое совпадение при малых значениях $\alpha\beta$ пока справедливо сделанное в известной модели допущение. При дальнейшем увеличении $U_{вх}$ известная модель становится некорректной, при этом расхождение кривых достигает 10—15 %. Эффективность применения данного генератора для измерения оптико-физических параметров различных сред передачи рассмотрена на примере его использования при определении длины и показателя преломления интегрального волновода. Показано, что проектировать датчик на основе ОЭГ следует исходя из компромисса между уровнем ЧМ-шумов и расстоянием между соседними частотами в его спектре, что, по сути, является компромиссом между точностью измерения длины и диапазоном измеряемых длин. В ходе модельного эксперимента по измерению длины кремниевое волновода оптоэлектронной интегральной схемы получена чувствительность измерений 50 кГц/мм на частоте генерации 2 ГГц, что легко различить при помощи

современного анализатора спектра радиочастотного диапазона.

Л и т е р а т у р а

1. **Белкин М. Е., Сигов А. С.** Новое направление фотоники — сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901—914.
2. **Lowery A. J.** Active photonic integrated circuits // Optoelectronic Devices: Advanced simulation and analysis. N. Y.: Springer, 2005. P. 427—449.
3. **Ханспенджер Р.** Интегральная оптика. М.: Мир, 1985.
4. **Andreev V. A., Indukaev K. V.** The rytov-vladimirskii phase and interferometric measurements // J. Rus. Laser Research. 2001. V. 22. N 1. P. 1—22.
5. **Yao X. S., Maleki L., Eliyahu D.** Progress in the optoelectronic oscillator — a ten year anniversary review // IEEE MTT Symp. Digest. 2004. TU6C-4. P. 287—290.
6. **Duy N. L. e. a.** Opto-electronic oscillator: applications to sensors // Intern. Topics' Meeting 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conf. MWP/APMP. 2008. P. 131—134.
7. **Белкин М. Е.** Разработка модели оптоэлектронного генератора СВЧ-диапазона // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы VI междунар. науч.-техн. конф. / Под. ред. А. С. Сигова. М.: Энергоатомиздат, 2008. С. 289—297.
8. **RF photonic technology in optical fiber links** / Ed. William S. Chang. Cambridge (UK): Cambridge university press, 2002.
9. **Li G. L., Yu P.K.L.** Wide-bandwidth optical intensity modulators // Handbook of optical components and engineering / Ed. K. Chang. John Wiley & Sons Inc. N. J. (USA), 2003. P. 1009—1078.
10. **Андреев В. С.** Теория нелинейных электрических цепей. М: Радио и связь, 1982.
11. **Лопарев А. В.** Моделирование процесса самовозбуждения оптоэлектронного генератора СВЧ колебаний // Научный вестник МИРЭА. 2010. № 2 (9). С. 41—48.
12. **Himeno A., Kato K., Miya T.** Silica-based planar lightwave circuits // IEEE J. Selected topics in quantum electronics. 1998. V. 4. N 6. P. 913—924.
13. **Leeson D. B.** A simple model of the feedback oscillator noise spectrum // Proc. IEEE. 1966. V. 54. N 2. P. 329—330.
14. **Yao X. S., Maleki L.** Optoelectronic oscillator for photonic systems // IEEE J. Quantum electronics. 1996. V. 32. N 7. P. 1141—1149.

Дата принятия 13.07.2010 г.