

*Микитчук К.Б., Чиж А.Л., Малышев С.А.
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск*

Оптический усилитель на легированном эрбием волокне для оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования оптического усилителя на легированном эрбием волокне для использования в оптоэлектронном генераторе СВЧ на линиях задержки вместо СВЧ-усилителя с низким фазовым шумом. В работе представлены результаты исследования фазового шума, коэффициента усиления оптического усилителя, а также фазового шума оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки с оптическим усилением.

Ключевые слова: Коэффициент усиления, оптический усилитель на легированном эрбием волокне, оптоэлектронный генератор СВЧ, фазовый шум.

Оптоэлектронные генераторы СВЧ на линиях задержки (ОЭГЛЗ) широко исследуются как автогенераторы частоты с низким фазовым шумом для систем радиосвязи, радиолокации и измерительной СВЧ-техники. В ОЭГЛЗ СВЧ-сигнал с помощью оптического модулятора преобразуется в модулированный по интенсивности оптический сигнал, задерживаемый в длинной волоконно-оптической линии. После волоконно-оптической линии задержки обратное оптоэлектронное преобразование осуществляется с помощью мощного высокоскоростного фотодиода, сигнал с выхода которого поступает на узкополосный СВЧ-фильтр, через который замыкается контур ОЭГЛЗ. Для компенсации потерь, возникающих в первую очередь при электрооптическом и оптоэлектронном преобразовании в ОЭГЛЗ, применяется как оптическое, так и электронное усиление [1,2]. В ОЭГЛЗ с электронным усилением фазовый шум ограничен фликкер-шумом СВЧ-усилителя [2]. Таким образом, снижение собственного фазового шума усилителя, компенсирующего потери в контуре обратной связи, является основным методом уменьшения фазового шума ОЭГЛЗ.

Полностью оптическое усиление потенциально позволяет снизить фазовый шум ОЭГЛЗ [2]. В отличие от оптических усилителей, предназначенных для волоконно-оптических систем связи, в ОЭГЛЗ нет необходимости обеспечивать спектральную равномерность коэффициента усиления в широком диапазоне длин волн, так как модулированный по интенсивности оптический сигнал имеет ширину спектра менее 1 нм даже при частоте ОЭГЛЗ свыше 40 ГГц. Конструкцию оптического усилителя на легированном эрбием волокне можно оптимизировать для получения наиболее низкого шума в режиме насыщения при входной мощности оптической несущей более -10 дБм, что является типичным для ОЭГЛЗ. Кроме того, энергетическая эффективность и стабильность оптического усилителя на легированном эрбием волокне могут быть улучшены путем использования для накачки лазерного диода с распределенной обратной связью и длиной волны генерации 1490 нм.

На рис.1 представлена схема оптического усилителя, который используется в ОЭГЛЗ с оптическим усилением [3]. В ОЭГЛЗ электрооптическое преобразование осуществляется

путем модуляции по интенсивности излучения лазерного диода с распределенной обратной связью с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера. Задержка оптического сигнала осуществляется в длинном отрезке оптического волокна. Оптический усилитель в контуре ОЭГЛЗ сконструирован на основе легированного эрбием волокна [Fibercore M-12], а также двух лазерных диодов (длина волны генерации 1490 нм, мощность 15 дБм) и двух волоконно-оптических мультиплексоров по длине волны, с помощью которых реализуется двунаправленная накачка. Следует отметить, что паразитная оптическая генерация в оптическом усилителе на легированном эрбием волокне подавляется с помощью четырех волоконно-оптических изоляторов. Оптический усилитель на легированном эрбием волокне аналитически описывается только в случае, если его коэффициент усиления в режиме малых сигналов составляет величину менее 20 дБ. Для выполнения амплитудного условия генерации в контуре ОЭГЛЗ необходимы оптические усилители с большим коэффициентом усиления, поэтому в данной работе теоретическое исследование конструкции оптического усилителя проводилось с использованием численной модели, основанной на однородной двухуровневой аппроксимации усиления в легированном эрбием волокне [4,5]. Электрооптическое преобразование осуществляется путем детектирования сигнала с помощью мощного InGaAs СВЧ-фотодиода. В качестве узкополосного СВЧ-фильтра используется фильтр на основе полого металлического резонатора.

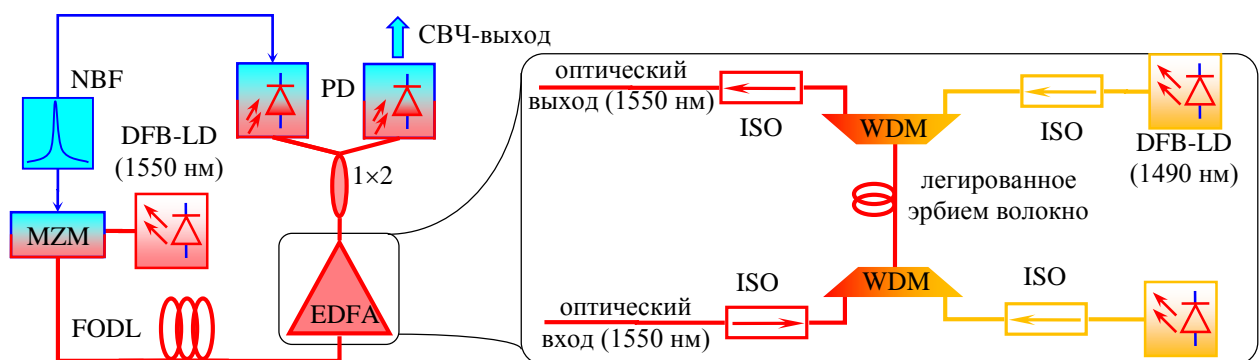


Рис. 1. Схема оптического усилителя на легированном эрбием волокне, используемого в ОЭГЛЗ с оптическим усилением: DFB-LD – лазерный диод с распределенной обратной связью, MZM – электрооптический модулятор Маха-Цендера, FODL – волоконно-оптическая линия задержки, NBF – узкополосный СВЧ-фильтр, PD – мощный высокоскоростной фотодиод, WDM – волоконно-оптический мультиплексор по длине волны, ISO – волоконно-оптический изолятор

Эквивалентный собственный шум оптического усилителя на легированном эрбием волокне, обусловленный биениями оптического сигнала с усиленным спонтанным излучением, является основным источником фазового шума в ОЭГЛЗ с оптическим усилением [3]. Так как глубина модуляции оптического сигнала в ОЭГЛЗ составляет величину порядка 100%, то эквивалентный собственный фазовый шум оптического усилителя равен значению эквивалентной относительной интенсивности шума оптического усилителя плюс 3 дБ. Эквивалентная относительная интенсивность шума оптического усилителя в свою очередь рассчитывается из теоретических или экспериментальных данных: коэффициента усиления и спектральной плотности мощности усиленного спонтанного излучения. На рис. 2 приведен результат расчета выходной мощности оптического сигнала на выходе и эквивалентный собственный фазовый шум оптического усилителя в зависимости от длины легированного эрбием волокна. Из рисунка видно, что

максимальный коэффициент усиления оптического достигается при длине легированного волокна в диапазоне от 8 до 16 метров, причем при увеличении мощности оптической несущей на входе оптимальная длина легированного эрбием волокна уменьшается. Для мощности оптической несущей на входе, равной 0 дБм, мощность сигнала на выходе оптического усилителя оказывается выше 15 дБм, что соответствует энергетической эффективности оптического усилителя более 50%. Эквивалентный собственный фазовый шум оптического усилителя для оптимальной длины легированного эрбием волокна составляет величину от -159 до -144 дБн/Гц.

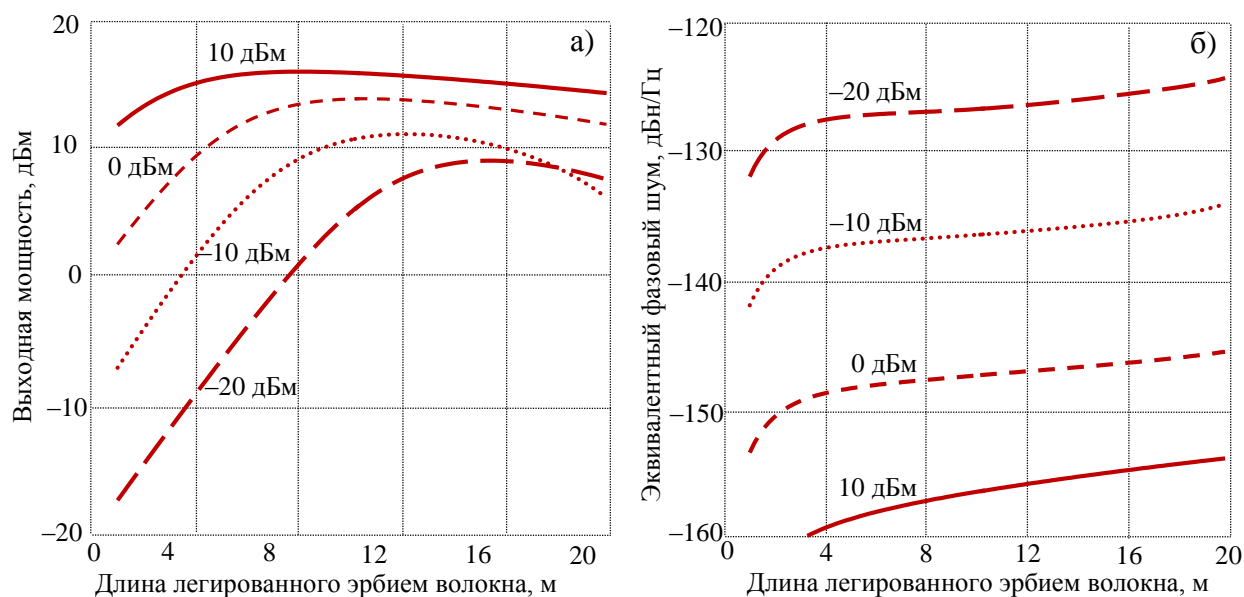


Рис. 2. Мощность оптического сигнала на выходе (а) и эквивалентный собственный фазовый шум (б) оптического усилителя в зависимости от длины легированного эрбием волокна (двунаправленная оптическая накачка мощностью 15 дБм на длине волны 1490 нм).

На рис. 3 приведены результаты измерения коэффициента усиления и эквивалентного собственного фазового шума оптического усилителя на легированном эрбием волокне в зависимости от мощности встречной накачки. Из рисунка видно, что эквивалентный коэффициент усиления для СВЧ-сигнала возможно изменять в диапазоне от 17 дБ до 27 дБ путем регулирования мощности встречной накачки от 0 до 15 дБм (мощность прямой накачки при этом остается постоянной). Необходимо отметить, что мощность накачки достаточно просто регулируется с помощью изменения тока накачки лазерного диода. Следует отметить, что коэффициент усиления типичного электронного СВЧ-усилителя с низким фазовым шумом не превышает $8 \div 15$ дБ. Эквивалентный коэффициент усиления оптического усилителя для СВЧ-сигналов, наоборот, достигает 30 дБ, причем значение коэффициента усиления сохраняется постоянным для всего диапазона частот волоконно-оптической линии задержки в составе ОЭГЛЗ, который достигает значения свыше 50 ГГц (эквивалентный коэффициент усиления оптического усилителя измерялся с помощью векторного анализатора цепей [Anritsu MS4645B] в частотном диапазоне от 0,1 до 50 ГГц). Во всем диапазоне изменения коэффициента усиления оптического усилителя эквивалентный собственный фазовый шум изменяется не более, чем на 0,4 дБ. Таким образом, оптический усилитель на легированном эрбием волокне в ОЭГЛЗ обеспечивает регулировку коэффициента усиления для СВЧ-сигналов более, чем на 10 дБ, без изменения фазового шума. Уменьшение мощности прямой накачки с 15 до 13 дБм позволяет

уменьшить эквивалентный коэффициент усиления для СВЧ-сигналов до 10 дБ без значительного изменения фазового шума. Однако, дальнейшее уменьшение мощности прямой оптической накачки приводит к значительному увеличению эквивалентного фазового шума оптического усилителя.

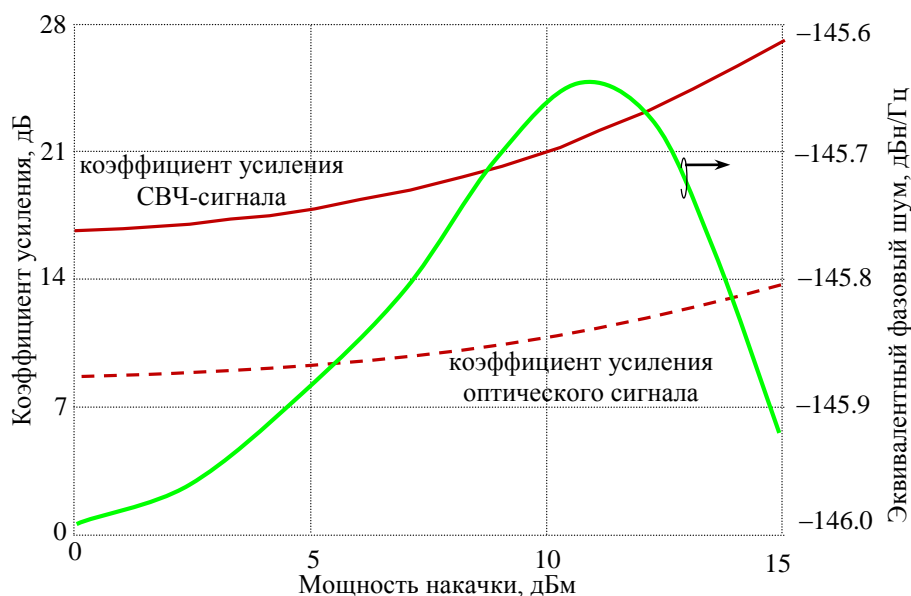


Рис. 3. Коэффициент усиления и эквивалентный собственный фазовый шум оптического усилителя на легированном эрбием волокне в зависимости от мощности встречной оптической накачки (мощность прямой оптической накачки 15 дБм, длина легированного эрбием волокна 10 м, глубина оптической модуляции 100%)

На рис. 4 приведен фазовый шум ОЭГЛЗ на основе экспериментального образца оптического усилителя на легированном эрбием волокне. Из рисунка видно, что вблизи СВЧ-несущей (8 ГГц) можно выделить 4 следующие области отстроек: 1) от 1 Гц до 15 Гц, где фазовый шум обратно пропорционален четвертой степени отстройки от частоты несущей; 2) от 15 Гц до 0.5 кГц, где фазовый шум обратно пропорционален третьей степени отстройки от частоты несущей; 3) от 0.5 кГц до 100 кГц, где фазовый шум обратно пропорционален квадрату отстройки от частоты несущей; 4) свыше 100 кГц, где в спектре преобладают дискретные составляющие на собственных частотах волоконно-оптической линии задержки ОЭГЛЗ, уровень которых определяется конструктивными параметрами генератора. В первых двух областях фазовый шум ОЭГЛЗ определяется когерентными оптическими процессами, приводящими к генерации шума с неравномерной спектральной плотностью мощности. В третьей области в соответствии с моделью Лисона фазовый шум определяется эквивалентным фазовым шумом оптического усилителя на легированном эрбием волокне, который оценивается как минимальный уровень спектральных составляющих в спектре («шумовая полка») и составляет величину порядка – 146 дБн/Гц. Таким образом, использование оптического усиления в ОЭГЛЗ позволяет получить генерацию с фазовым шумом менее – 130 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей в X-диапазоне частот, причем обратная пропорциональность фазового шума квадрату отстройки от частоты генерации сохраняется для отстроек свыше 0.5 кГц.

В работе исследован коэффициент усиления и эквивалентный собственный фазовый шум оптического усилителя на легированном эрбием волокне с двунаправленной накачкой. Показано, что при использовании в контуре оптоэлектронного генератора СВЧ на линиях задержки оптического усилителя вместо СВЧ-усилителя с низким фазовым шумом

достигается коэффициент усиления свыше 27 дБ, при этом эквивалентный фазовый шум оптического усилителя для отстройки вблизи несущей составляет величину порядка – 146 дБн/Гц. Установлено, что оптический усилитель на легированном эрбием волокне обеспечивает регулировку коэффициента усиления для СВЧ-сигналов более, чем на 10 дБ, без изменения собственного фазового шума, путем управления мощностью оптической накачки с помощью изменения тока накачки лазерного диода. Показано, что использование оптического усиления в ОЭГЛЗ позволяет получить генерацию с фазовым шумом менее – 130 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей в X-диапазоне частот, причем обратная пропорциональность фазового шума квадрату отстройки от частоты генерации сохраняется для отстроек свыше 0.5 кГц.

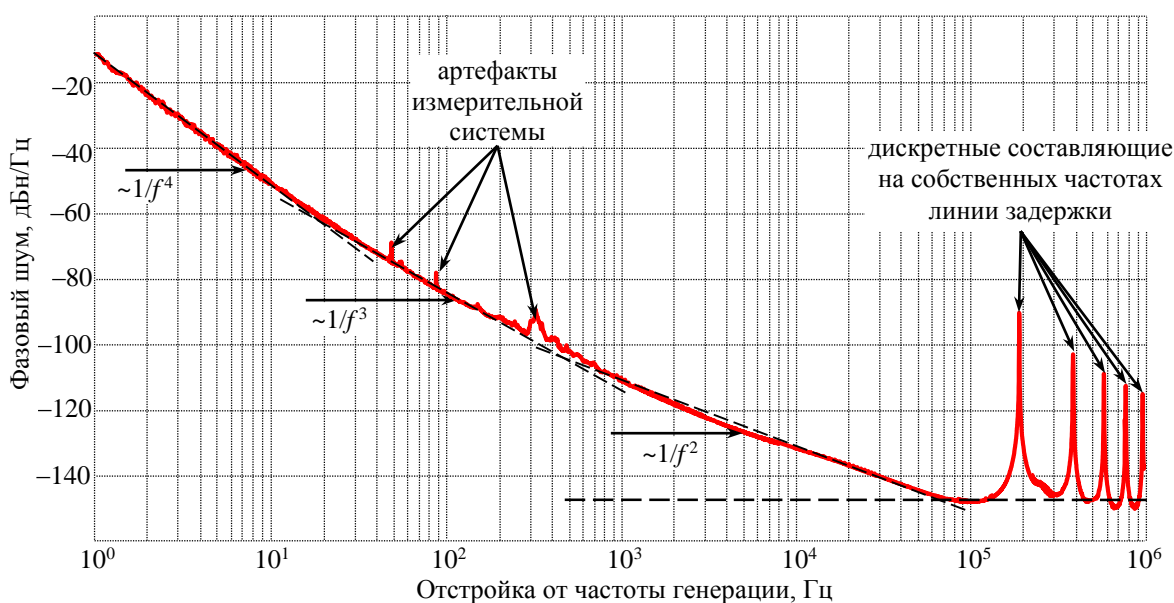


Рис. 4. Фазовый шум ОЭГЛЗ на основе оптического усилителя на легированном эрбием волокне (двунаправленная накачка на длине волны 1490 нм с мощностью +15 дБм, длина легированного эрбием волокна – 10 м, глубина оптической модуляции – 100%, частота генерации – 8 ГГц, система измерения RohdeSchwarz FSWP-26).

Библиографический список

1. X. S. Yao, "Opto-electronic oscillators", in RF photonic technology in optical fiber links, W. S. C. Chang, Ed. New York: Cambridge Univ. Press, 2002, pp. 255-293.
2. P. S. Devgan, V. J. Urick, J. F. Diehl, and K. J. Williams, "Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photonic gain," *Lightwave Technol.*, vol.27, no.15, pp.3189–3193, 2009.
3. K. Mikitchuk, A. Chizh and S. Malyshev, "Modeling and Design of Delay-Line Optoelectronic Oscillators," *IEEE J. of Quant. Electronics*, vol. 52, no. 10, pp. 1-8, Oct. 2016.
4. E. Desurvire, *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers*, 2nd ed., M. Dignonnet, Ed. New York: Marcel Dekker, 2001, 778 p.
5. C. R. Giles and E. Desurvire, "Modeling erbium-doped fiber amplifiers", *J. Lightwave Technol.* vol. 9. no. 2, pp. 271-283, 1991.
6. A. Lalotias, E. M. Yeatman and S. J. Al-Bader, "Modeling signal and ASE evolution in erbium-doped amplifiers with the method of lines," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 1589-1600, 2006.