

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПО ГЕНЕТИЧЕСКОМУ АЛГОРИТМУ

© 2011 г. М. А. Ходасевич, канд. физ.-мат. наук; Г. В. Синицын, канд. физ.-мат. наук;
Ю. А. Варакса

Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

E-mail: y.varaxa@ifanbel.bas-net.by

Проведено моделирование работающего в режиме ненасыщенного усиления эрбиевого волоконного усилителя на основе силикатного волокна. С помощью генетического алгоритма осуществлен поиск значений параметров эрбиевого волоконного усилителя с целью одновременной оптимизации шумовой и передаточной характеристик устройства. Показана возможность одновременного получения низких значений шум-фактора (6,0–8,0 дБ) и приемлемой для локальных линий связи неравномерности спектра усиления (1,8–3,8 дБ) в спектральной полосе 1540–1560 нм.

Ключевые слова: эрбиевый волоконный усилитель, генетический алгоритм.

Коды OCIS: 060.2320, 060.2410

Поступила в редакцию 13.01.2011

В настоящее время оптимизация волоконных усилителей, используемых в современных волоконно-оптических линиях связи со спектральным уплотнением каналов, является важной научно-технической задачей. Наряду с поиском новых активаторов и материалов матриц для получения широких спектров усиления предпринимаются меры для уменьшения собственных шумов усилителей и выравнивания спектров их усиления. Собственные шумы характеризуются величиной, показывающей, во сколько раз отношение сигнал/шум на входе усилителя больше, чем отношение сигнал/шум на его выходе, и называемой шум-фактором. К параметрам эрбиевого волоконного усилителя (ЭВУ), в частности, относятся концентрация ионов эрбия в материале волокна, длина волокна, мощность накачки, направления и длины волн комбинированной накачки. В процессе разработки ЭВУ важно получить такое сочетание параметров устройства, которое позволит одновременно получить низкое значение шум-фактора и приемлемую для локальных линий связи равномерность спектра усиления.

В настоящей работе проведено моделирование режима ненасыщенного усиления (мощность сигнала и усиленной люминесценции не влияет на инверсную населенность) ЭВУ на

основе активированного эрбием силикатного волокна с мультиплексированной накачкой. Этот режим дает удовлетворительное описание ЭВУ в реальных коммуникационных линиях. Мультиплексирование излучения накачки (применение распространяющихся навстречу друг другу накачек с длинами волн 980 нм и 1480 нм) дает возможность выравнивания спектра усиления в коммуникационной С-полосе [1]. Использованная модель ЭВУ применима при следующих предположениях.

- Излучение распространяется в виде фундаментальной моды волокна и неполяризовано. Сечение фундаментальной моды имеет гауссову форму и одинаково для всех спектральных компонент сигнала, накачки и усиленной люминесценции.

- Полоса усиления однородно уширена.

- Распределение ионов эрбия в сердцевине волокна однородно и ограничивается радиусом, меньшим или равным радиусу фундаментальной моды волокна.

- Излучения накачки и сигнала поглощаются только ионами эрбия (фоновым поглощением можно пренебречь).

Уравнения, описывающие распространение сигнала и накачки в волокне, имеют следующий вид [2]:

$$\frac{dp_i^\pm}{dz} = \alpha_i p_i^\pm \frac{[(\eta_i - \eta_2)/(1 + \eta_2)]q_2 + \eta_i q_3 - 1}{q_2 + q_3 + 1} + 2\alpha_i p_{0i} \eta_i \frac{[1/(1 + \eta_2)]q_2 + q_3}{q_2 + q_3 + 1}, \quad (1)$$

$$\frac{dq_2}{dz} = -\alpha_2 q_2 \frac{\eta_2 q_3 - 1}{q_2 + q_3 + 1}, \quad (2)$$

$$\frac{dq_3}{dz} = -\alpha_3 q_3 \frac{[\eta_2/(1 + \eta_2)]q_2 + 1}{q_2 + q_3 + 1}. \quad (3)$$

Здесь p_i^\pm – нормированная на мощность насыщения $P_s(\nu) = h\nu\pi\omega^2\{\sigma_e(\lambda)[1 + \eta(\nu)]\tau\}^{-1}$ суммарная мощность сигнала и усиленной люминесценции, распространяющихся в положительном и отрицательном направлениях, соответственно, на длине волны λ_i , h – постоянная Планка, ω – радиус моды, τ – время жизни метастабильного уровня, ν – частота излучения, z – продольная координата, q_2 и q_3 –

мощности излучений накачек, нормированные на соответствующие мощности насыщения. Нижний индекс 2 у q указывает на квазидвухуровневую схему накачки с длиной волны $\lambda_2 = 1480$ нм, 3 – на трехуровневую схему ($\lambda_3 = 980$ нм), p_{0i} – нормированная эквивалентная мощность входного шума в полосе частот $\delta\nu$, $\eta_i = \sigma_e(\lambda_i)/\sigma_a(\lambda_i)$, $\eta_2 = \sigma_e(\lambda_2)/\sigma_a(\lambda_2)$, $\eta_3 = \sigma_e(\lambda_3)/\sigma_a(\lambda_3)$, σ_e и σ_a – сечения испускания и поглощения ионов эрбия, $\alpha_i = \sigma_e(\lambda_i)\rho_0\Gamma$, $\alpha_2 = \sigma_e(\lambda_2)\rho_0\Gamma$, $\alpha_3 = \sigma_e(\lambda_3)\rho_0\Gamma$, ρ_0 – концентрация активатора в сердцевине волокна, $\Gamma = 1 - \exp(-a_0^2/\omega^2)$, a_0 – радиус активированной сердцевины волокна.

Решение однородной части линейного дифференциального уравнения (3) позволяет согласно определению, приведенному в работе [3], найти коэффициент усиления G ЭВУ, а решение всего неоднородного уравнения (3) – минимальную величину шум-фактора F_0 , которые могут быть представлены следующими выражениями:

$$G(l) = \exp\left\{\int_0^l \alpha_i [(\eta_i - \eta_2)/(1 + \eta_2)]q_2(z) + \eta_i q_3(z) - 1\right\} / [q_2(z) + q_3(z) + 1] dz, \quad (4)$$

$$F_0(l) = 1/G(l) + 4 \int_0^l \alpha_i \eta_i / G(z) [q_2(z)/(1 + \eta_2) + q_3(z)] / [q_2(z) + q_3(z) + 1] dz. \quad (5)$$

Здесь l – длина волокна ЭВУ.

Задаваемые параметры ЭВУ выбирались в соответствии с приведенными в работе [3]: диаметр сердцевины волокна 3,9 мкм, радиусы моды сигнала и накачки равны радиусу сердцевины волокна, радиационное время жизни метастабильного уровня 10 мс. Входные мощности спектрально уплотненных сигналов в интервале длин волн 1540–1560 нм равнялись –30 дБм.

Для решения многопараметрической задачи поиска оптимальных параметров ЭВУ использовался генетический алгоритм (ГА), который показал свою эффективность в широком диапазоне исследовательских задач, где не могут применяться прямые методы. ГА можно охарактеризовать как алгоритм эвристического поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования с помощью отбора, комбинирования и изменения поисковых параметров с использованием механизмов, подобных биологической эволюции [4].

С использованием ГА проведен поиск максимума следующей функции приспособленно-

сти F , описывающей зависимость шума усилителя и неравномерности спектра усиления от параметров устройства:

$$F = (1 - k) \left[\sum_i (G(\lambda_i) - G_0)^2 \right]^{-1} + k \left[\sum_i F_0(\lambda_i) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где G_0 – заданное значение усиления. Использовались следующие параметры ГА:

- пропорциональный отбор – вероятность принятия участия в создании следующего поколения пропорциональна значению приспособленности особи (т. е. набора искомым параметров ЭВУ),

- одноточечный кроссовер (простейший тип скрещивания: каждая из пары родительских особей разделяется в одной случайной точке, и две дочерние особи составляются из соответствующих частей родительских особей),

- стратегия элитизма (принудительное сохранение наиболее приспособленной особи при формировании следующего поколения для исключения возможности потери найденных решений с увеличенными значениями функции приспособленности),

