

Ю. А. Варакса, Г. В. Сеницын, М. А. Ходасевич

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ «ЧЕРНОГО ЯЩИКА» ДЛЯ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Для передачи больших объемов информации в настоящее время используются волоконно-оптические линии связи, обязанные своим широким распространением в первую очередь эрбиевым волоконным усилителям (ЭВУ). Для представляющего собой достаточно сложную вычислительную задачу строгого моделирования спектров усиления и шумовых характеристик ЭВУ обычно применяется подход, базирующийся на балансных уравнениях с учетом усиленной люминесценции. Этот подход требует знания спектров сечений поглощения и испускания ионов эрбия, их концентрации и распределения в волокне, длины и коэффициента поглощения волокна, мощности накачки, спектра входного сигнала и параметров пассивных оптических элементов внутри усилителя.

Отличительной чертой другого подхода к моделированию ЭВУ, базирующегося на модели «черного ящика» [1, 2], является направленность на уже функционирующие системы. В этой модели используются только легко измеряемые передаточные характеристики усилителя без детальных знаний его структуры и особенностей. Модель «черного ящика» справедлива в предположении однородного уширения полосы усиления квази-двухуровневой системы, описывающей свойства материала сердцевины волокна, в которой можно пренебречь частью активных ионов, не находящихся ни в основном, ни в возбужденном состояниях. В этом случае усиление определяется усредненной по длине активного волокна инверсной населенностью.

В представленной работе нами модифицирована модель «черного ящика». Для моделирования используются два опорных спектра усиления  $G_1^{dB}(\lambda)$  и  $G_2^{dB}(\lambda)$  для разных значений инверсии в волокне и коэффициент усиления  $G^{dB}(\lambda_{ref})$  на референсной длине волны  $\lambda_{ref}$  для третьей величины инверсии, для которой и определяется спектр усиления  $G^{dB}(\lambda)$ :

$$G^{dB}(\lambda) = (1 - a)G_1^{dB}(\lambda) + aG_2^{dB}(\lambda),$$

Здесь  $a = (G_1^{dB}(\lambda_{ref}) - G^{dB}(\lambda_{ref})) / (G_1^{dB}(\lambda_{ref}) - G_2^{dB}(\lambda_{ref}))$ , индекс  $dB$  показывает, что величины измеряются в децибелах. Видно, что искомый спектр представляет собой линейную комбинацию двух опорных спектров, коэффициенты при которых дополняют друг друга до единицы, что

позволяет при  $a = 0$  и  $a = 1$  описывать и сами эти спектры. По сравнению с традиционно используемыми в модели «черного ящика» «функциями наклона» [1, 2], не имеющими явного физического смысла, применение предложенного представления позволяет сделать этот подход интуитивно понятнее.

Нами была проанализирована точность моделирования экспериментальных спектров при выборе различных опорных спектров и исследована зависимость точности моделирования от референсной длины волны.

В первой части работы были рассмотрены следующие случаи опорных спектров (указана относительная инверсия, соответствующая  $G_1^{dB}(\lambda)$  и  $G_2^{dB}(\lambda)$ ):

- 1) -100% и 100% (искомые спектры интерполируются по опорным);
- 2) 0% и 100% (в области положительных инверсий происходит интерполяция, а в области отрицательных инверсий – экстраполяция);
- 3) 0% и 20% (искомые спектры экстраполируются по опорным).

На рис.1 представлены расчетные результаты и экспериментальные данные [2] спектров усиления ЭВУ, соответствующих опорным случаям полной инверсии и отсутствия накачки.

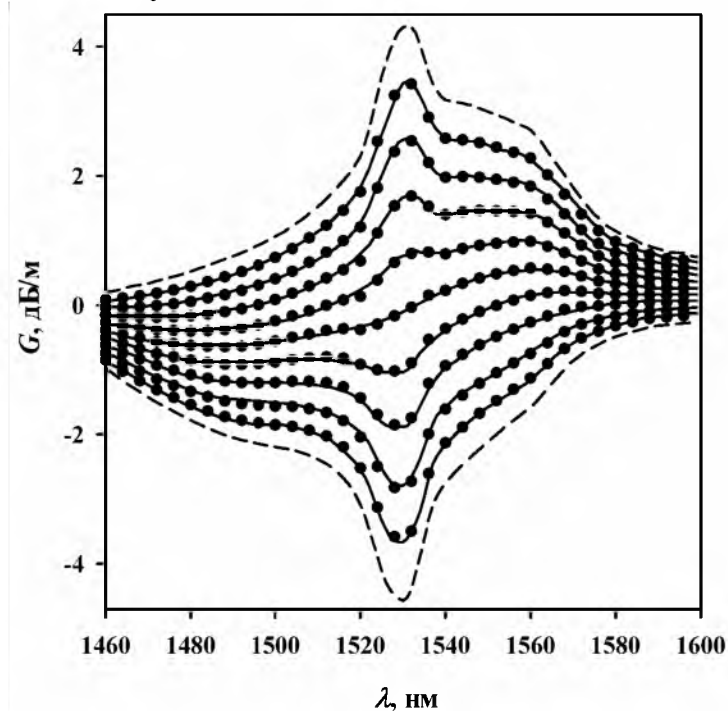


Рис. 1. Спектры усиления ЭВУ для относительной инверсии от -100% до 100% с шагом 20%. Результаты моделирования представлены точками, экспериментально измеренные спектры — линиями. Опорные спектры обозначены пунктирными линиями, референсная длина волны 1550 нм.

Анализ результатов, полученных при исследовании точности моделирования в зависимости от выбора опорных спектров, позволяет сделать следующие выводы.

1. Максимум погрешности моделируемых спектров приходится на спектральную область вблизи пика усиленной люминесценции (~1530 нм)
2. При небольшом отличии опорных спектров погрешность искомым спектров значительна.
3. При увеличении разницы между опорными спектрами максимальная погрешность моделирования уменьшается (при референсной длине волны 1520 нм до 0,25дБ/м для опорных спектров, соответствующих полной инверсии среды и отсутствию накачки).
4. При большой разнице между опорными спектрами погрешность моделируемых спектров для режимов с большим усилением значительно превышает погрешность для режимов с отрицательной инверсией.

При исследовании влияния выбора положения  $\lambda_{ref}$  на точность моделирования спектров усиления ЭВУ референсная длина волны искомого спектра могла располагаться с обеих сторон от пика усиленной люминесценции (1530 нм). На рис.2 представлены результаты, полученные для  $\lambda_{ref} = 1560$  нм.

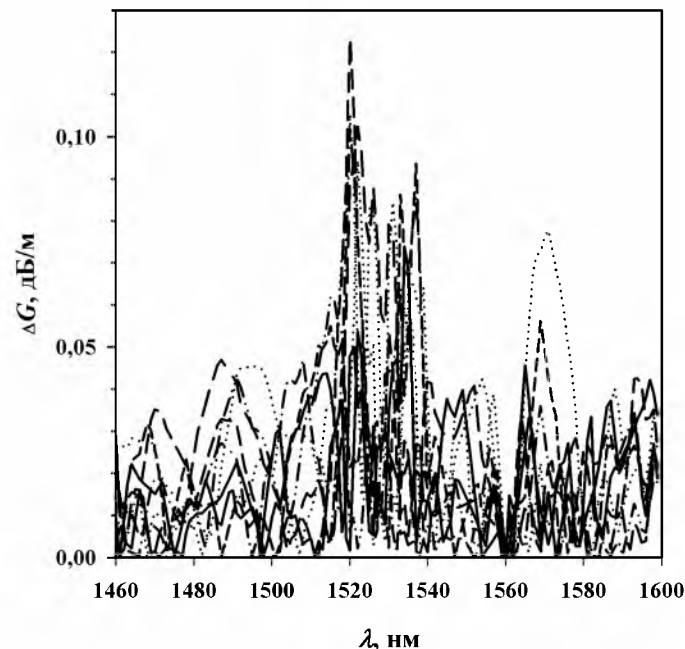


Рис. 2. Неравномерность спектров усиления ЭВУ для относительной инверсии от -100% до 100% с шагом 20%. Референсная длина волны 1560 нм.

При смещении референсной длины волны в длинноволновую сторону в диапазоне 1520–1560 нм погрешность моделируемых спектров вблизи пика усиленной люминесценции уменьшается от величины 0,25 дБ/м для 1520 нм до 0,12 дБ/м для 1560 нм. Однако, при  $\lambda_{ref} = 1560$  нм стали возрастать погрешности моделируемых спектров за пределами окрестности пика усиленной люминесценции.

Итак, при моделировании ЭВУ показано, что на основе двух опорных спектров усиления для разных значений инверсии в волокне и значения коэффициента усиления на референсной длине волны для третьего значения инверсии можно моделировать спектр усиления для этого значения инверсии с погрешностью, не превышающей 0,13 дБ/м вблизи пика усиленной люминесценции и 0,07 дБ/м в остальной части S-, C- и L-полос. Наименьшая погрешность модели «черного ящика» наблюдается при использовании опорных спектров усиления, соответствующих полной инверсии среды и отсутствию накачки. Кроме того, референсная длина волны должна выбираться на плато усиления ЭВУ (1540–1560 нм).

#### Литература

1. *Burgmeier J., Cords A., Marz R., et al.* A Black Box Model of EDFA's Operating in WDM Systems // *J. Lightwave Tech.* 1998. Vol. 16, № 7. P. 1271–1275.
2. *Vanin E.V., Persson U., Jakobsen G.* Spectral Function Forms for Gain and Noise Characterization of Erbium-Doped Fiber Amplifiers // *J. Lightwave Tech.* 2002. Vol. 20, № 2. P. 243–249.