

С.А. Останин

Демодуляция оптического сигнала в усилителе лазерного излучения

Для приема и измерения слабых оптических сигналов используют, кроме прочего, усилитель лазерного излучения. Часто полезная информация содержится в переменной составляющей интенсивности принимаемого излучения. В том случае, когда ширина полосы модуляции интенсивности лазерного излучения превышает ширину полосы фотоэлектрического преобразователя (фотодетектора), для детектирования полезного сигнала применяют метод демодуляции, заключающийся в преобразовании спектра исходного сигнала (например, перенос спектра). Одним из популярных методов такого преобразования является смешивание сигнального и опорного лазерного излучения на квадратичном детекторе или в резонаторе лазера. При этом конструкция должна содержать источник опорного лазерного излучения, от качества которого зависит отношение сигнал/шум оптического сигнала.

В данной работе предложен метод демодуляции оптического сигнала, интенсивность которого модулирована по частоте, в усилителе лазерного излучения без использования источника опорного лазерного излучения. Технология демодуляции может быть основана на управлении нерезонансными потерями в усилителе.

Рассмотрим уравнения переноса [1], полученные из кинетических уравнений для лазерного усилителя, для случая высокого насыщения и большом линейном усилении:

$$J_2/J_0 = (a/b)(1 - \exp(-bl)) + (J_1/J_0)\exp(-bl), \quad (1)$$

где J_1 – интенсивность входящего в усилитель лазерного излучения; J_2 – интенсивность усиленного лазерного излучения; J_0 – интенсивность насыщения; a – линейный коэффициент усиления; b – коэффициент нерезонансных потерь; l – длина активной среды усилителя.

Условие высокой степени насыщения опишем как $J_2/J_0 \gg 1$, $J_1/J_0 \gg 1$, а большого линейного усиления – как $a/b \gg 1$. Если входящее в усилитель лазерное излучение модулировано по частоте ($J_1 = f(\varphi_{01}, \varphi_1(t))$), где φ_{01} – быстро меняющаяся часть фазы интенсивности; $\varphi_1(t)$ – медленно меняющаяся часть фазы (несущая полезную информацию), то величина интенсивности усиленного лазерного излучения J_2 также будет функцией быстро меняющейся части фазы интенсивности φ_{01} и медленно меняющейся части фазы интенсивности $\varphi_1(t)$. Второе слагаемое выражения (1) содержит произведение физических величин, определяющих свойства оптического поля и свойства усиливающей

среды. Следовательно, процесс демодуляции можно реализовать путем модуляции параметра усиливающей системы. Проще всего реализовать модуляцию коэффициента нерезонансных потерь b . Так как первое слагаемое в (1) не содержит параметров внешнего поля, можно считать, что $(J_1/J_0)\exp(-bl)$ – величина аддитивная. Это позволит нам при рассмотрении процесса демодуляции не анализировать влияние первого слагаемого на функцию J_2 .

Рассмотрим простейший случай модуляции коэффициента нерезонансных потерь b :

$$b(t) = b_0(1 - \gamma \cos(\varphi_{b01} + \varphi_{b1})), \quad (2)$$

где b_0 – амплитудное значение не резонансных потерь; $\gamma = \Delta b/b_0$; Δb – величина приращения потерь, определяющая глубину модуляции; φ_{b01} – быстро меняющаяся часть фазы интенсивности; φ_{b1} – начальное значение фазы.

Выберем частоту амплитудной модуляции ω_b нерезонансных потерь таким образом, чтобы величина $\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{b01} = (\omega_{01} - \omega_{b01})t = \Delta\omega t$ соответствовала ширине полосы фотодетектора $\Delta\omega_d$ (т.е. $\Delta\omega_d < \Delta\omega$).

Представим $J_1 = f(\varphi_{01}, \varphi_1(t))$ в виде частотно-модулированной функции

$$J_1 = J_{01}(\cos(\varphi_{01} + \varphi_1(t))) \quad (3)$$

и рассмотрим второе слагаемое уравнения (1) после подстановки в него $b(t)$ и J_1 , заданных в явном виде:

$$[J_{01}(\cos(\varphi_{01} + \varphi_1(t)))/J_0][\exp(-b_0 l (1 - \gamma \cos(\varphi_{b01} + \varphi_{b1})))]. \quad (4)$$

Полный набор частот модулированного колебания (4) может быть получен с использованием тригонометрических формул и функции Бесселя. Для выяснения возможности демодуляции, т.е. выделения медленно меняющихся слагаемых сигнала, сделаем оценку слагаемого (4), основанную на разложении экспоненты в ряд, оставив два его первых члена (что допустимо ввиду малости величины потерь b)

$$\begin{aligned} & [J_{01}(\cos(\varphi_{01} + \varphi_1(t)))/J_0][\exp(-b_0 l (1 - \gamma \cos(\varphi_{b01} + \varphi_{b1})))] \approx \\ & \approx [J_{01}(\cos(\varphi_{01} + \varphi_1(t)))/J_0] \\ & [1 - b_0 l (1 - \gamma \cos(\varphi_{b01} + \varphi_{b1})) + \\ & + 0,5 b_0^2 l^2 (1 - \gamma \cos(\varphi_{b01} + \varphi_{b1}))^2]. \quad (5) \end{aligned}$$

После несложных преобразований тригонометрических функций можно получить, что (5) содержит слагаемое с множителем, зависящим от времени как $\cos(\Delta\varphi - \varphi_1(t))$, где $\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{b01} = (\omega_{01} - \omega_{b01})t = \Delta\omega t$; $\varphi_1(t)$ – медленно меняющаяся часть фазы, несущая полезную информацию. Поскольку $\Delta\omega_d < \Delta\omega$, то возможно осуществление демодуляции частотно-зависимой составляющей сигнала. Если величина ω_{01} известна, можно установить частоту модуляции потерь $\omega_{b01} = \omega_{01}$

с целью снижения ширины полосы демодулируемого сигнала до ширины полосы функции $\varphi_1(t)$. Технически реализовать модулятор потерь можно с использованием пьезокерамического или электрооптического преобразователя.

В случае модуляции длины активной среды усилителя l можно добиться аналогичных результатов. Однако техническая реализация модулятора длины не так проста. Длину твердотельного активного элемента

усилителя можно изменять пьезокерамическим преобразователем в крайне небольших пределах. Другой вариант модуляции – оптико-механический: с помощью зеркала, управляемого пьезокерамическим преобразователем, усиливаемое излучение перемещается в пределах усиливающей среды так, что углу поворота зеркала α соответствует длина пути излучения в активной среде l , в соответствии с некоторой известной функцией $\alpha(l)$.

Библиографический список

1. Карлов, Н.В. Лекции по квантовой электронике / Н.В. Карлов. – М., 1983.