

ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

А. В. Холенков

При исследовании различных сред, в частности в биологии и медицине, используется метод квазиупругого рассеяния света. Так как доплеровские сдвиги частоты при рассеянии на движущихся биочастицах невелики, применение обычных методов спектрального анализа весьма затруднительно или вообще невозможно.

Одним из наиболее интересных вариантов когерентного приема оптического излучения является фотосмещение в среде самого зондирующего лазера. Существует два способа регистрации сигнала самосмещения: с помощью фотодетектора либо в цепи питания самого лазера. Последний способ более прост, так как для его реализации требуется только один лазер. В этом случае для анализа в качестве выходной величины регистрируется так называемый оптоэлектронный сигнал (ОЭС).

Полупроводниковые лазеры обладают высоким коэффициентом усиления и низкой добротностью резонатора, а также имеют малые размеры и низкую стоимость. Однако по своим шумовым характеристикам они уступают другим видам лазеров.

В связи с этим на первый план выходит проблема оценки уровня шума в полупроводниковом лазере с оптической обратной связью и исследования его шумовых характеристик в зависимости от технических параметров.

Спектр ОЭС в лазере с оптической обратной связью

Как показано в [1], величина ОЭС в лазере с оптической обратной связью от среды определяется выражением:

$$S \sim \frac{2\kappa \nu n}{C I < 7_g (t \mp WC)} \exp(i\omega_g t_g) \exp(i2kr_m(t)), \quad (1)$$

где γ - коэффициент, характеризующий величину обратной связи от среды; n_g - групповой показатель преломления активного слоя лазера;

Γ - коэффициент ограничения для генерирующей моды; $\kappa_e = (dU/dr)_{0h, n_{th}}$ - концентрация электронов в режиме стационарной генерации.

Тогда, после записи для SU корреляционной функции, на основании теоремы Винера-Хинчина спектр ОЭС в будет выглядеть следующим образом [1]:

$$\chi(Q) = R_{oe}(0) \int_0^\infty \exp(-2Mr) \exp(-Qr) dr \quad R_{oe}(0) = \frac{M}{\Gamma + a^2} \frac{2\kappa_e |y| n_g}{c\Gamma_{ог}} \quad (2)$$

Из (2) видно, что спектр оптоэлектронного сигнала сосредоточен возле нулевой частоты.

Шум ОЭС

Для исследования шума воспользуемся моделью, описанной в [2]. Тогда для полупроводникового лазера можно записать следующие уравнения для концентраций электронов и фотонов:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{c\Gamma}{ng} (n - n_g) \left[\frac{1}{m_{ph}} n_{ph} + \Gamma \frac{n}{m} + f_{ph}(t) \right], \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = -J_d - nr_t a (n - n_g) n_{ph} - \frac{n}{T_s} + f_n(t) \quad (4)$$

где $f_n(t)$ и $f_{ph}(t)$ - обозначение источников ланжевенковского шума; T_s , T_{ph} - времена жизни электронов и фотонов соответственно.

Уравнения (3), (4) записаны для лазера, в котором внешняя оптическая обратная связь отсутствует, но присутствуют вредные шумы. Если обратная связь от рассеивающей среды является источником информационного (полезного) сигнала, то ланжевенковский шум является вредным. При высоком уровне шума полезный сигнал может быть полностью замаскирован шумом.

Применение к (3) и (4) преобразований Фурье и проведение усреднения по времени дает аналитическую формулу для спектра шумов концентрации электронов на p-n переходе лазера [2].

При расчетах использовались значения параметров, характерные для полупроводниковых лазеров GaAs-AlGaAs ($\Gamma_{ог} = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$, $n_g = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $\kappa_e = 2 \cdot 10^4$, $ng = 4.2$). На рисунках (1) и (2) показан теоретически рассчитанный спектр флуктуации электронов на p-n переходе лазера при различных значениях тока инжекции и зависимость резонансной частоты от тока инжекции, где J_{th} - величина порогового тока.

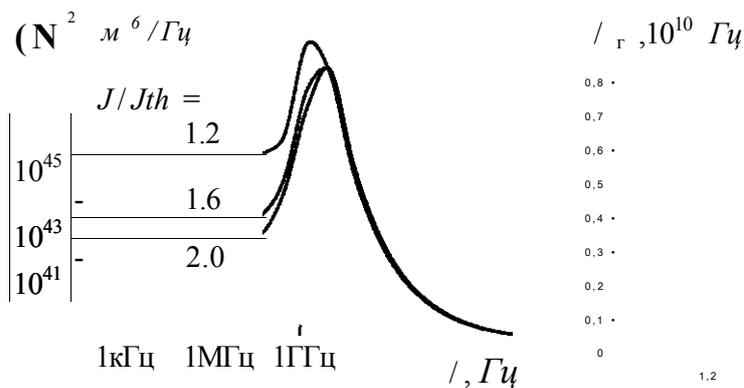


Рис.1. Спектр шума концентрации электронов при различных значениях тока инжекции

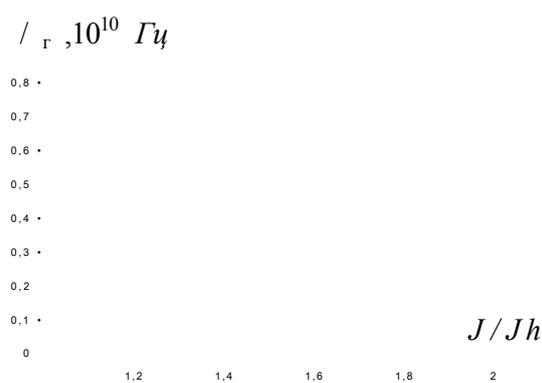


Рис.2. Зависимость резонансной частоты от тока инжекции

На рисунке (1) мы видим типичный шумовой спектр с пиком на резонансной частоте порядка гигагерц. С увеличением порогового тока резонансная частота сдвигается в сторону высоких частот.

Из графиков видно, что на частотах от 0 Гц до порядка 10 МГц спектральная плотность шума практически не зависит от частоты и находится на постоянном уровне примерно $2 \cdot 10^{45} \text{ м}^{-6}/\text{Гц}$ (для $J/J_{th}=1.2$).

Спектр ОЭС сосредоточен возле нулевой частоты, а при работе с биологическими потоками доплеровские сдвиги частоты составляют 10 Гц - 10 МГц. Тогда при теоретическом расчете спектра на основании рисунков 1 и 2 можно положить, что шум не зависит от частоты.

Зависимость величины квантового шума от технических параметров лазера. Отношение сигнал/шум

Величина шума в полупроводниковом лазере зависит от многих параметров, но большинство из них трудно изменить. Реально в наших условиях мы можем варьировать только некоторые из них, например длину собственного резонатора l и коэффициент отражения выходного зеркала R_2 .

Расчеты показывают, что для снижения уровня шума требуется увеличивать длину собственного резонатора лазера и повышать коэффициент отражения выходного зеркала.

Спектр ОЭС, описываемый формулами (2), также зависит от этих параметров. Как показано в [3], параметр u определяется выражением:

$$Y = \frac{c}{2ng} \frac{(1 - R_2)}{ljR_2} v \exp(-iS(p)), \quad (5)$$

где v - коэффициент, учитывающий изменение амплитуды волны при рассеянии; δp - изменение начальной фазы волны при рассеянии.

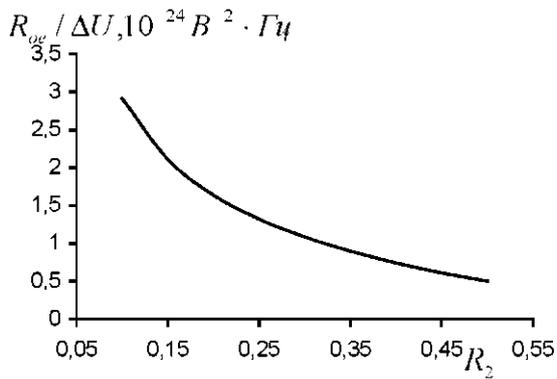


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум от коэффициента выходного зеркала R_2

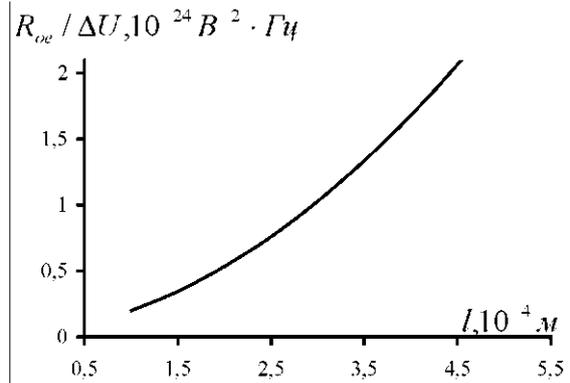


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал/шум от длины собственного резонатора l

Согласно [1] спектр шума напряжения будет пропорционален величине AU :

$$AU = (\kappa_e)^2 (H^2) . \quad (6)$$

Рассмотрим отношение сигнал/шум. На рисунках 3 и 4 показана зависимость отношения величины $R_{oe} = R_{oe}(0)/R^{\circ}_e(0)$ к спектральной плотности шума, где $R^{\circ}_e(0)$ - значение $R_{oe}(0)$ при $l=300$ мкм и $R_2=0.3141$.

Заключение

При помощи модели [2] рассчитан шумовой спектр концентрации электронов на p-n переходе лазера. Для диапазона рабочих частот (10 Гц-100 МГц) получены значения спектральной плотности шума концентрации электронов порядка 10^{-10} м⁻³/Гц.

Показано, что увеличению отношения сигнал/шум способствует увеличение длины собственного резонатора и просветление выходного зеркала.

К сожалению, рассмотренный выше квантовый шум является нижним пределом шумов. При учете технического (1/f) шума следует ожидать ухудшения шумовой характеристики.

Литература

1. Карих Е. Д. Метод самосмещения в спектроскопии квазиупругорассеянного лазерного излучения// Журнал прикладной спектроскопии. 2002. Т.69. N.6. с. 762-767.
2. Andrekson P. A., Andersson P., Alping A., Eng S. T. In SITU characterization of laser diodes from wide-band electrical noise measurements// Journal of lightwave technology. 1986. V.4. N.7. с.804-812.
3. Карих Е. Д. Обобщенная модель полупроводникового лазера с оптической обратной связью от рассеивающей среды// Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. 2002. Информатика. N.1. с. 20-26.