

# Динамика полупроводникового лазера и метки времени\*

**А.Н.Ораевский**

*Анализируется возможность использования релаксационных колебаний полупроводникового лазера для получения меток времени.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, релаксационные колебания, метки времени.

В настоящее время фемтосекундные импульсы находят широкое применение в лазерной метрологии [1]. В этом случае стабилизация периода следования фемтосекундных импульсов с помощью СВЧ стандарта частоты обеспечивает получение меток времени, которые можно регистрировать с точностью, определяемой длительностью отдельного импульса.

Получение длительной последовательности фемтосекундных импульсов относится к высоким лазерным технологиям. Между тем хорошо известно, что лазеры класса В при возбуждении релаксационных колебаний могут генерировать непрерывную последовательность достаточно коротких импульсов при сравнительно неглубокой модуляции накачки или добротности [2]. Длительность таких импульсов зависит от параметров лазера и для полупроводниковых лазеров значение  $10^{-12}$  с является вполне достижимым. В этом случае точность фиксирования метки времени составит  $\sim 10^{-12}$  с. Такая точность оказывается достаточной для ряда практических применений.

Чтобы выяснить возможности этого метода получения меток времени, рассмотрим следующую стандартную динамическую модель полупроводникового лазера:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\tau_c} + i\Delta \right) E + \frac{1}{2} g(n)(1 + i\alpha)E, \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = J - \frac{1}{\tau_s} n - g(n) \frac{|E|^2}{8\pi\hbar\omega},$$

где  $\tau_c$  – время затухания резонатора;  $J$  – ток накачки;  $\tau_s$  – время затухания инверсии;  $g(n)$  – форм-фактор;  $n$  – инверсная населенность;  $\Delta$  – отстройка частоты генерации от частоты резонансного перехода;  $\alpha$  – коэффициент амплитудно-фазовой связи. При неглубокой модуляции добротности резонатора, описываемой формулой

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_{c0}} (1 + m \cos \Omega t), \quad (2)$$

\*Над корректурой статьи работал И.Е.Проценко.

**А.Н.Ораевский.** Физический институт им. П.Н.Лебедева, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 26 июня 2003 г.

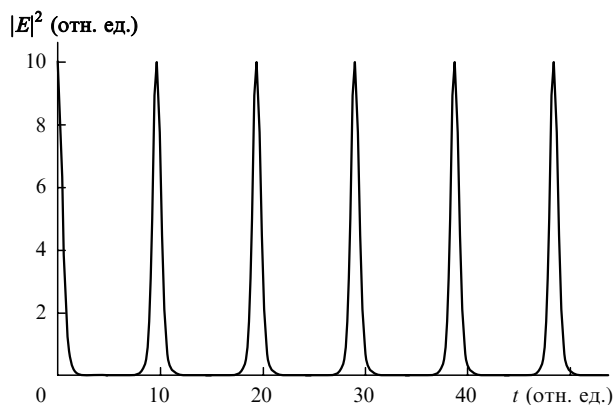


Рис.1. Релаксационные пульсации излучения лазера класса В.

лазер может быть введен в режим регулярных релаксационных пульсаций интенсивности, типичный вид которых показан на рис.1. Период этих пульсаций  $T$  определяется частотой модуляции  $\Omega$ :  $T = 2\pi/\Omega$ . Если частота модуляции задается высокоточным СВЧ стандартом, то период пульсаций лазера также будет им контролироваться.

Для удобства рассмотрения введем понятие размаха пульсаций  $C$  как отношения максимума импульса интенсивности лазерного излучения к ее среднему значению. Аналитическая теория релаксационных пульсаций излучения лазеров разработана в [3, 4]. Согласно этой теории период пульсаций  $T$  связан с их размахом  $C$  соотношением

$$T(C) = \frac{2}{\Omega_0} \left[ \sqrt{C} + \frac{2}{\sqrt{C}} \operatorname{arcosh} \left( \frac{C}{2} \right)^{1/2} \right], \quad (3)$$

где

$$\Omega_0 = [(\eta - 1)/(\tau_s \tau_{c0})]^{1/2} \quad (4)$$

– частота релаксационных колебаний;  $\eta = J/J_{th}$ ;  $J_{th}$  – пороговый ток. Из формулы (3) видно, что задание частоты модуляции, а следовательно, и периода пульсаций определяет их размах. При достаточно большом размахе

$$C \approx \pi^2 \frac{\Omega_0^2}{\Omega^2}. \quad (5)$$

Пульсации интенсивности с большим размахом происходят в том случае, если глубина модуляции  $m$  превышает некоторое пороговое значение

$$m_{\text{th}} \approx \frac{\eta}{6\pi} \frac{C^2}{\ln C}. \quad (6)$$

Из соотношений (4) и (5) следует, что размах пульсаций связан с параметрами лазера следующим образом:

$$\eta - 1 = \frac{C}{\pi^2} \tau_s \tau_{c0} \Omega^2. \quad (7)$$

Формально стабильность периода пульсаций лазерного излучения должна определяться только стабильностью источника модулирующего излучения. Однако наличие спонтанного излучения приводит к флуктуациям как интенсивности импульсов выходного излучения, так и периода их следования. Влияние спонтанного излучения сказывается наиболее сильно в области между импульсами. Согласно [3, 4] отношение интенсивности между лазерными импульсами к средней интенсивности излучения лазера определяется формулой

$$\frac{E_{\text{min}}^2}{E_{\text{av}}^2} = e^{-C/2}. \quad (8)$$

Для уменьшения влияния флуктуаций, обусловленных спонтанным излучением, необходимо, чтобы интенсивность  $E_{\text{min}}$  превышала интенсивность спонтанного излучения в одну (генерируемую) моду. Воспользовав-

шись результатами работ [5, 6], в которых рассчитана вероятность спонтанного излучения в резонаторе, и формулой (8), можно показать, что это требование приводит к условию

$$C < 2 \ln \left( \frac{VE_{\text{sat}}^2 \eta - 1}{\hbar\omega \eta} \right), \quad (9)$$

где  $E_{\text{sat}}$  – амплитуда насыщающего поля;  $V$  – объем генерируемой моды. Для полупроводникового лазера это условие ограничивает параметр  $C$ :

$$C < 20 - 30. \quad (10)$$

Однако вопрос о стабильности интервала между метками времени, генерируемыми полупроводниковым лазером, должен в конечном счете решаться экспериментально.

1. Багаев С.Н. *Фемтосекундные оптические часы и прецизионные оптические эксперименты. Доклад на междунар. конф. «Лазерная физика и применения лазеров»* (Минск, 2003).
2. Ханин Я.И. *Основы динамики лазеров* (М.: Наука, 1999).
3. Беленов Э.М., Морозов В.Н., Ораевский А.Н. *Труды ФИАН*, **52**, 237 (1970).
4. Ораевский А.Н. *Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика*, **4** (1), 3 (1996).
5. Бункин Ф.В., Ораевский А.Н. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **2** (2), 181 (1959).
6. Ораевский А.Н. *УФН*, **164** (4), 415 (1994).