

ГЕНЕРАЦИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРАХ С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД И МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

А.М. Леонтович, Н.В. Сидорук

Аналитически и численно исследован процесс самосинхронизации мод (ССМ) в твердотельных лазерах с модуляцией добротности с одним или с двумя поглотителями, имеющими разные сечения поглощения. Определены зависимости качества, надежности ССМ и длительности ультракороткого импульса от параметров системы.

В работе /1/ показано, исходя из "флуктуационной модели" /2, 3/, что в импульсном лазере с насыщающимся фильтром (НФ) и большим коэффициентом усиления активной среды (ИАГ — Nd, рубин при низкой температуре) длительность генерируемого ультракороткого импульса (УКИ) зависит от параметра X , введенного в /2/ и представляющего отношение начального просветления поглотителя и насыщения активной среды:

$$X = \sigma_F n_F a \Phi / \sigma_A \tilde{n} \Phi_{cb} . \quad (1)$$

Здесь индексы А и F относятся соответственно к активной среде и поглотителю; $\sigma_{A, F}$ — сечения рабочих переходов; $n_{A, F}$ — эффективные (приведенные к длине резонатора L) концентрации атомов или молекул; a — "телескопическое отношение" (отношение геометрических сечений потоков в активном элементе и поглотителе); Φ — поток фотонов, насыщающий активную среду; $\Phi_{cb} = (\sigma_F \tau_F)^{-1}$ — поток фотонов, просветляющий поглотитель; τ_F — время релаксации населенности верхнего уровня молекул поглотителя; \tilde{n} — максимальное превышение инверсии населенности активных атомов над пороговой.

Высокая эффективность ССМ получается при близости X к критической величине X_Q ($X \cong X_Q$ и $X > X_Q$). Если $X < X_Q$, то гигантский импульс не развивается. При этом чем больше τ_F , тем критичнее условие для получения УКИ наименьшей длительности /1/. Это заставляет для надежной генерации УКИ использовать поглотители с малым τ_F . Но при этом увеличивается Φ_{cb} , возрастает порог генерации УКИ, а вероятность полной ССМ уменьшается. Чтобы избежать этого, фокусируют излучение на кювету с поглотителем, что увеличивает вероятность пробоя и снижает эффективность ССМ.

В настоящей работе исследуется альтернативная ситуация — ССМ в лазере с предварительной модуляцией добротности /1/ или с дополнительным поглотителем, имеющим более низкий уровень просветления (обычно — с большим τ_F).

Лазер с открывающимся затвором. В этой системе внутри резонатора, кроме активного элемента и кюветы с НФ, находится затвор (например, электрооптический), модулирующий добротность. В результате генерируется гигантский импульс, просветляющий поглотитель. В процессе просветления НФ может происходить синхронизация мод. Оценим ее, используя (1). Роль \tilde{n} в (1) играет разность начальной инверсии n_i и пороговой величины n_{th} .

Из теории импульсной добротности /4, 5/ оценим максимальный поток гигантского импульса:

$$\Phi = c(n_i - n_{th} + n_{th} \ln(n_{th}/n_i)) . \quad (2)$$

Приближенно, считая $n_i - n_{th} \ll n_i$, получим:

$$X = \tilde{n} ca / [2\Phi_{cb} (1 + \sigma_A n_R / \sigma_F n_F)],$$

31

где n_R — пороговая величина n для генерации без поглотителя.

На основании балансовых уравнений и флуктуационной модели /1/ рассчитывалась генерация УКИ в лазере на ИАГ — Nd ($\sigma_A \cong 10^{18} \text{ см}^2$) при комнатной температуре. Численные эксперименты производились с разным значением начального пропускания поглотителя $T_0 = \exp(-\sigma_F n_F L)$ и разными \tilde{n} . Для каждого из них вычислялась величина X по формуле (3) и эффективность ССМ η (число синхронизованных мод).

На рис. 1 приведены примеры зависимостей потока фотонов максимального Φ_1 и второго по величине Φ_2 выбросов на проход резонатора, η и длительности максимального выброса на проход τ_u от числа проходов при $X \cong X_Q$. На рис. 2 даны пиковые значения η и минимальные τ_u при изменении X/X_Q . Зависимость η и τ_u от X/X_Q оказывается близкой к той, которая получается без затвора /1/, однако развитие УКИ происходит меньше чем за несколько десятков проходов, когда отношение X/X_Q велико. Разброс появления пикового УКИ по отношению к моменту открытия затвора определяется статистической природой начального шума и в численных примерах был обычно не больше времени T обхода резонатора (несколько наносекунд).

Преимущества данной системы состоят в возможности управлять энергией генерации с помощью выбора n_i и моментом ее начала, а также в большей устойчивости по отношению к X/X_Q .

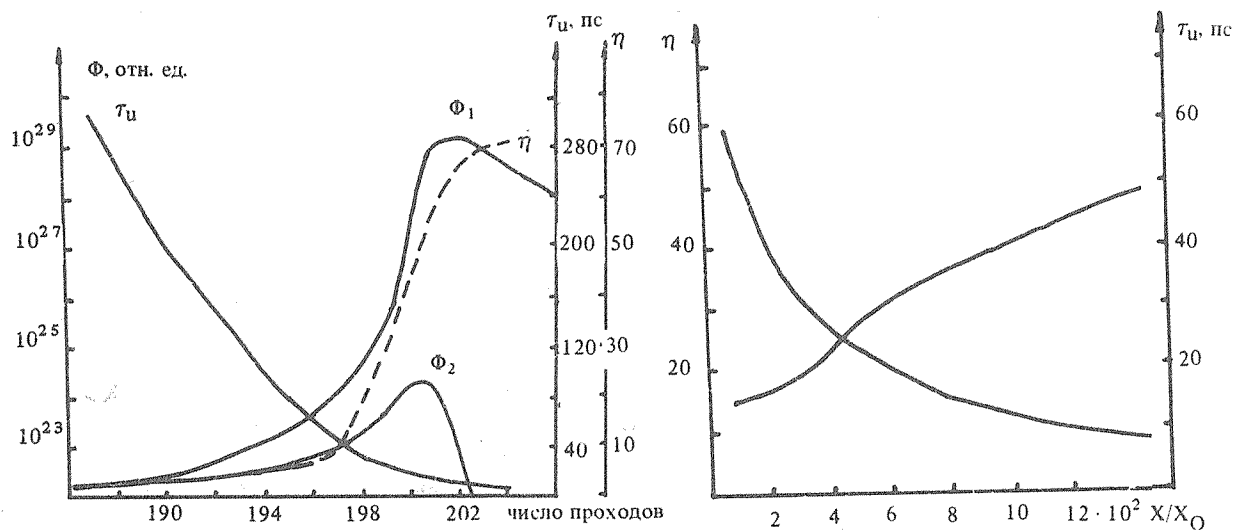


Рис. 1. Зависимость плотности потока фотонов для максимального (Φ_1) и второго по величине (Φ_2) выбросов, а также длительности максимального импульса в цуге (τ_u) и эффективности ССМ (η) от числа проходов резонатора при $X \cong X_Q$.

Рис. 2. Зависимость пиковых значений η и минимальных значений τ_u от превышения "второго порога".

Лазер с двумя поглотителями. Если поглотители имеют различные значения σ_F , $\sigma_{\bar{F}}$ и n_F , $n_{\bar{F}}$, то просветление разных сортов молекул происходит с разной скоростью. Величина X зависит от суммы просветлений обоих красителей:

$$X = (a\Phi / \sigma_A \tilde{n}) (\sigma_{\bar{F}} n_{\bar{F}} / \Phi_{cb} + \sigma_F n_F / \Phi_{cb}). \quad (4)$$

Приравняв (4) пороговому значению X_Q для генерации с ССМ и используя теорию свободной генерации /5/, получим выражение для пороговой скорости накачки:

$$\rho_2 = \rho_{th} + (X^2 \sigma_A^3 n_{th}^2 / c \tilde{n}_A a^2) (\sigma_F n_F / \Phi_{cb} + \sigma_F n_F / \Phi_{cb}'')^{-1}. \quad (5)$$

Здесь $n_{th} = (\sigma_F n_F + \sigma_F n_F + \sigma_A n_R) / \sigma_A$; ρ_{th} — пороговая накачка свободной генерации с поглотителями.

В работе /6/ экспериментально исследовался лазер с составным затвором, содержащим поглотители с малым τ_F и большим τ_F . Обнаружено, что при постоянной пороговой накачке и постоянном начальном пропуске обоих красителей T_0 зависимость обратного телескопического отношения a^{-1} от концентрации красителя n_F , который просветляется первым, оказывается линейной. Это согласуется с зависимостью, которая следует из (5):

$$a^{-1} = (1/X_Q \sigma_A n_{th}) [(c \tilde{n}_A / \sigma_A) (\rho_2 - \rho_{th})]^{1/2} (\sigma_F n_F / \Phi_{cb}' + \sigma_F n_F / \Phi_{cb}''). \quad (6)$$

Из (5) также следует, что внесение в лазерную систему с одним поглотителем и высоким порогом генерации (Φ_{cb} большое или τ_F малое) второго поглотителя с малым Φ_{cb} (большим τ_F) понизит порог. Эффективность ССМ при генерации зависит от X . Эту величину можно приближенно вычислить, представив просветление низкорогового поглотителя аналогично модуляции добротности и применив для X формулу (3):

$$X = c n_F n_F' \sigma_F' \sigma_F'' a / [2 \sigma_A^2 \Phi_{cb}'' (\sigma_F n_F + \sigma_F n_F' / \sigma_A)]. \quad (7)$$

Если, оставив суммарное начальное пропускание T_0 постоянным, изменять относительное содержание ξ в растворе красителя, имеющего более низкий уровень просветления (относительное содержание второго красителя равно $1-\xi$), то это выражение для X принимает вид:

$$X = c \sigma_F' \sigma_F'' \xi (1-\xi) (\ln T_0^{-1})^2 a / [2 \Phi_{cb}'' \sigma_A^2 L^2 (\sigma_F' \xi + \sigma_F'' (1-\xi))^2]. \quad (8)$$

Приравняв (8) критическому значению X_Q , получим уравнение для наиболее выгодной, с точки зрения качества ССМ, концентрации ξ .

Полученные результаты имеют лишь качественный характер ввиду грубости модели. В частности, она не применима при $\xi \approx 1$. Кроме того, в ней не учитывалось, что на первом этапе генерации, при просветлении поглотителя с малым Φ_{cb} , уже происходит некоторая синхронизация мод, а рассматривались только процессы, имеющие место при просветлении НФ с высоким порогом.

При обычных параметрах лазера на ИАГ — Nd и $T_0 = 0,6$ концентрация ξ достаточно мала ($\approx 15\%$) ввиду крутой и почти линейной зависимости X от ξ .

Из приведённых соображений и формулы (7) следует, что качество ССМ с двумя поглотителями не зависит от накачки, в противоположность случаю с одним НФ /1/, к тому же в такой системе возникают УКИ минимальной длительности. Последнее утверждение экспериментально продемонстрировано в /6/: УКИ с минимальным $\tau_{\mu} = 15$ пс получают с применением составного затвора (в лазере на ИАГ — Nd).

Таким образом, система с двумя поглотителями позволяет независимо управлять порогом генерации (по формуле (5)) и качеством синхронизации. Это дает основание для ее применения в лазерах с пассивной синхронизацией мод.

Авторы благодарны О.П. Варнавскому за обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варнавский О. П. и др. Препринт ФИАН № 110, М., 1986.
2. New G. H. C. Proc. IEEE, 67, 380 (1979).
3. Круиков Р. Г., Летохов В. С. IEEE J. Quant. Electron., QE-8, 766 (1972).
4. Прохоров А. М. Радиотехника и электроника, 8, 1073 (1963).
5. Ханин Я. И. Динамика квантовых генераторов. М., Сов. радио, 1975.
6. Конященко А. В. и др. Квантовая электроника, 14, 813 (1987).

Поступила в редакцию 16 мая 1988 г.