

Влияние комбинированной релаксации насыщающегося поглощения на характеристики лазера с синхронизацией мод

О.Г.Охотников, Р.Херда

Показано, что комбинированная динамика насыщающихся поглотителей, обусловленная балансом механизмов медленной и быстрой релаксации, позволяет получать режим самостартующей пассивной синхронизации мод одновременно с эффективной компрессией импульсов.

Ключевые слова: квантоворазмерные полупроводники, нелинейная оптика полупроводников, полупроводниковое зеркало с насыщающимся поглощением (SESAM), синхронизация мод.

1. Введение

Полупроводниковые насыщающиеся поглотители в настоящее время являются ключевыми компонентами при генерации коротких импульсов посредством пассивной синхронизации мод в твердотельных, полупроводниковых и волоконных лазерах. Основанные на современных полупроводниковых технологиях (молекулярно-пучковой эпитаксии или химическом осаждении из паровой фазы методом разложения металлоорганических соединений) полупроводниковые затворы обеспечивают гибкую подстройку оптических параметров, а также простоту ввода излучения в оптическое волокно и поляризационную нечувствительность.

Следует отметить, что в динамике релаксации полупроводниковых затворов может проявляться как быстрая, так и медленная временная компонента. Эти компоненты обусловлены внутризонными и межзонными переходами и оказывают влияние на начало процесса синхронизации мод и на процесс формирования импульса. Хотя в целях уменьшения длительности импульса быстрая компонента всегда предпочтительнее, она зачастую не может обеспечить самосинхронизацию мод, поскольку изначальные (затравочные) шумовые импульсы, имеющие значительную длительность, не в состоянии насытить быстрое поглощение. В то же время медленная временная компонента релаксации поглощения ответственна главным образом за установление импульсного режима, однако она неэффективна при формировании коротких импульсов, и для обеспечения режима фемтосекундных импульсов требуется содействие других механизмов, например формирование солитонов [1, 2].

В настоящей работе исследовано влияние динамики релаксации насыщающегося поглотителя (затвора или полу-

проводникового зеркала с насыщающимся поглощением, SESAM) на эволюцию перехода в импульсный режим генерации и формирование импульса в лазере с пассивной синхронизацией мод. Численный анализ лазерной генерации в присутствии поглотителя, имеющего быструю и медленную компоненты релаксации, показывает, что существуют оптимальные соотношения между их глубинами модуляции и постоянными времени, которые могут обеспечить как надежное начало режима генерации импульсов, так и эффективное уменьшение их длительности. Такой сценарий развития режима УКИ иллюстрируется путем сравнения динамики релаксации с учетом обеих компонент с процессом релаксации, включающим в себя только одну экспоненциальную компоненту – быструю или медленную.

2. Модель

Моделирование лазера с пассивной синхронизацией мод, использованное в данной работе и детально описанное ранее в [3], предполагает, что процесс стартует с уровня квантовых шумов и развивается в устойчивый режим синхронизации мод. Порог импульсного режима был принят соответствующим 10000 обходов по резонатору. Если за этот промежуток времени система не переходит в стабильный импульсный режим, то делается вывод о том, что данный режим синхронизации мод не является самовозбуждающимся. Временной шаг численного моделирования соответствует полному обходу резонатора, т. е. равен 10 нс для частоты следования импульсов 100 МГц. В модели лазера учитываются критичные для самовозбуждения эффекты, в частности зависимость отклика затвора от длительности импульса, спектральная фильтрация, обусловленная шириной контура усиления, дисперсия, фазовая самомодуляция и дискретное положение элементов резонатора. В модели пренебрегается медленной динамикой усиления, типичной для лазерных систем на стекле [1, 4].

Чтобы исключить влияние солитонов, обычно определяющих сжатие импульса и оставляющих таким образом за поглотителем только задачи выхода в импульсный режим и его стабилизацию [5], общая дисперсия резонатора полагалась нормальной со вторым и третьим порядками дисперсии $D_2 = 0.014 \text{ пс}^2$ и $D_3 = 0.0003 \text{ пс}^3$ соответственно. Не-

O.G.Okhotnikov. Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology, P.O. Box 692, FIN-33101 Tampere, Finland;

e-mail: oleg.okhotnikov@tut.fi

R.Herda. TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 Gräfelfing, Germany

Поступила в редакцию 13 апреля 2010 г., после доработки – 19 апреля 2011 г.

линейность в резонаторе была принята равной $5 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, а потери резонатора на обход составляли 4 дБ. Медленная и быстрая компоненты временного отклика SESAM определяются выражением

$$P_i(t) = P_i(t)[1 - q_0(t)] = P_i(t)[1 - q_{\text{slow}}(t)][1 - q_{\text{fast}}(t)], \quad (1)$$

где $P_i(t)$ – мощность излучения, падающего на затвор; $P_r(t)$ – мощность излучения, отраженного от затвора; $q_{\text{slow}}(t)$ и $q_{\text{fast}}(t)$ – медленный и быстрый отклики затвора; $q_0(t)$ – модуляция. Временная динамика обеих компонент описывается уравнением

$$\frac{dq_{\text{slow, fast}}(t)}{dt} = -\frac{q_{\text{slow, fast}}(t) - q_{0\text{slow, 0fast}}(t)}{\tau_{\text{slow, fast}}} - \frac{I(t)q_{\text{slow, fast}}(t)}{E_{\text{sat}}}, \quad (2)$$

где $I(t)$ – интенсивность падающего излучения; E_{sat} – энергия насыщения; $q_{0\text{slow}}$ и $q_{0\text{fast}}$ – вклады медленной и быстрой компонент в глубину модуляции; τ_{slow} и τ_{fast} – времена релаксации медленной и быстрой компонент. Решение уравнения (2) для $I(t) = 0$ и подстановка этих решений в уравнение (1) позволяют получить выражение для затухания отклика поглотителя, имеющего как быструю, так и медленную компоненту релаксации, в предположении, что $q_{\text{slow}} \ll 1$, $q_{\text{fast}} \ll 1$:

$$P_r(t) = P_i(t)[1 - q_{0\text{slow}} - q_{0\text{fast}} + q_{0\text{slow}}\exp(-t/\tau_{\text{slow}}) + q_{0\text{fast}}\exp(-t/\tau_{\text{fast}})].$$

Временной отклик такого поглотителя, использованный при численном моделировании, представлен на рис.1 при постоянных времени $\tau_{\text{slow}} = 200 \text{ пс}$ и $\tau_{\text{fast}} = 0.2 \text{ пс}$. При моделировании динамики релаксации с двумя экспонентами вклады обеих компонент в полный нелинейный отклик SESAM считаются одинаковыми, т. е. $\Delta R_{\text{fast}}/\Delta R_{\text{slow}} = 1$, где ΔR_{fast} и ΔR_{slow} – вклады быстрой и медленной компонент релаксации в суммарную глубину модуляции. Энергия насыщения $E_{\text{sat}} = 1 \text{ пДж}$, глубина модуляции $q_0 = 0.1$, т. е. $\Delta R_{\text{fast}} + \Delta R_{\text{slow}} = \Delta R_0 = 0.1$, где ΔR_0 – полная (суммарная) глубина модуляции отклика SESAM.

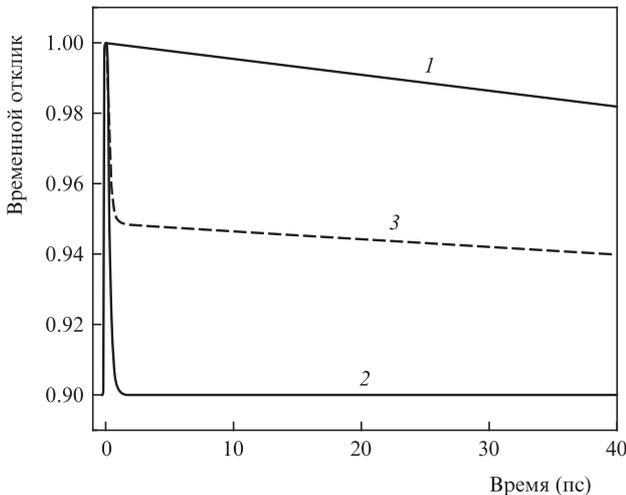


Рис.1. Временной отклик SESAM с медленной (1), быстрой (2) и комбинированной (3) динамиками релаксации.

3. Обсуждение результатов

На рис.2 показано развитие генерации импульса во время процесса самовозбуждения. Для этого использовалось трехмерное представление зависимостей длительности импульса и его спектральной ширины от числа обходов резонатора. На рис.2 также показаны проекции этих зависимостей на плоскости xy , xz и yz . На плоскости xy видно изменение спектральной ширины на каждом обходе. Она изменяется от спектральной ширины начального (затравочного) шума до спектральной ширины устойчивого импульса, возникшего на финальном этапе эволюции синхронизации мод. На плоскости xz представлена длительность импульса для каждого последовательного обхода резонатора. Начальная длительность импульса, соответствующая непрерывному излучению, при моделировании задается равной времени обхода резонатора. Проекция на плоскость yz отражает изменение во времени степени спектральной ограниченности импульса. Как и ожидалось, спектральная ширина импульсов ограничива-

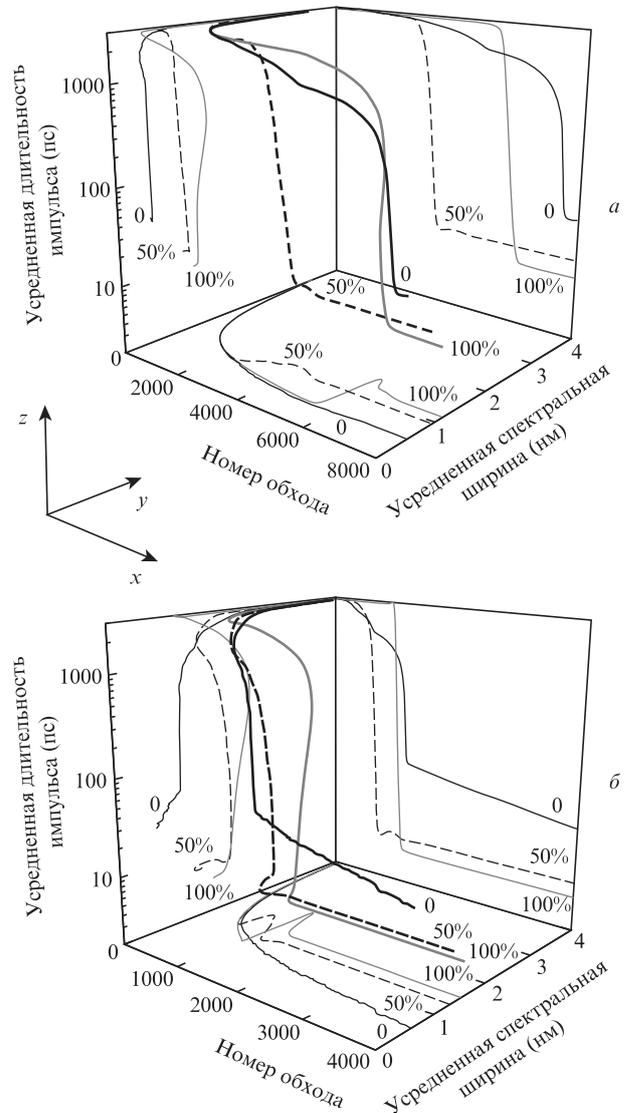


Рис.2. Развитие импульса в пространстве длительность импульса – спектральная ширина импульса – номер обхода по резонатору для глубин модуляции $\Delta R_0 = 3\%$ (а) и 10% (б) и относительного вклада быстрой компоненты поглотителя $\Delta R_{\text{fast}}/\Delta R_0 = 0, 50\%$ и 100% .

ется спектральной полосой усиления активной среды. Типичный сценарий развития синхронизации мод из спонтанного шума включает в себя стадию многоимпульсного режима, который устанавливается после нескольких сотен обходов по резонатору. В этом случае излучение состоит из усиленных импульсов со случайным временным положением и с прогрессивно уменьшающейся среднеквадратичной длительностью импульса, имеющего сильно подавленную шумовую составляющую. На следующей стадии развития многоимпульсная генерация преобразуется в режим одного импульса, когда одиночный импульс с минимальной длительностью, более широким спектром и большей пиковой интенсивностью начинает доминировать над фоном. Затем длительность и спектральная ширина импульса постепенно приближаются к устойчивым значениям. Спектральная ширина в оптимальном случае соответствует режиму генерации спектрально-ограниченных импульсов.

Развитие процесса моделировалось для различных глубин модуляции и относительных вкладов медленного и быстрого механизмов релаксации поглощения. Сравнение синхронизации мод для поглотителей с глубинами модуляции 3% и 10% подтверждает, что больший нелинейный отклик уменьшает время перехода в устойчивое состояние, и в результате формируются более короткие импульсы, что согласуется с общей теорией пассивной синхронизации мод [1, 5]. Для каждой глубины модуляции лазерное излучение обнаруживает схожее поведение в зависимости от соотношения медленной и быстрой компонент релаксации поглощения. В случае быстрого поглотителя без медленной компоненты релаксации (кривая 100% на рис.2) для запуска процесса синхронизации мод начальному шуму требуется множество проходов по резонатору, однако, когда импульс приобретает достаточную энергию, система быстро переходит в устойчивое состояние. В противоположность этому медленный поглотитель (кривая 0) обеспечивает заметное и быстрое формирование импульса из слабоинтенсивных возмущений на начальном этапе установления импульсного режима. Однако в этом случае временная компрессия недостаточна для генерации УКИ [1]. Анализ показывает, что устойчивая генерация не достигается даже после 10000 обходов резонатора (см. рис.2). Таким образом, поглотитель с медленной и быстрой компонентами (кривая 50%) обладает оптимальным балансом способности к самовозбуждению, конечной длительности и качества импульса, т.е. его близости к спектрально-ограниченным импульсам.

На рис.3 продемонстрировано влияние относительно вклада быстрого и медленного механизмов релаксации $\eta = \Delta R_{\text{fast}} / (\Delta R_{\text{fast}} + \Delta R_{\text{slow}})$ на характеристики лазера. Предполагается, что устойчивый режим достигается, когда отклонение $d^2 = (\sigma_t - \sigma_{t\text{fin}})^2 / \sigma_{t\text{fin}}^2 + (\sigma_\lambda - \sigma_{\lambda\text{fin}})^2 / \sigma_{\lambda\text{fin}}^2$ текущих среднеквадратичных значений временной (σ_t) и спектральной (σ_λ) ширины импульса от их среднеквадратичных значений в устойчивом состоянии $\sigma_{t\text{fin}}$ и $\sigma_{\lambda\text{fin}}$ составляет менее 0.01. Из рис.3 видно, что существует оптимальное соотношение между быстрым и медленным механизмами релаксации. Когда преобладает быстрая релаксация ($\eta > 0.8$), изначально длинные флуктуационные затравочные импульсы подвержены малому влиянию со стороны поглотителя, испытывают значительные потери и, как следствие, самовозбуждение развитого режима синхронизации мод начинается намного позже. При доминирующей медленной релаксации ($\eta < 0.35$) начальный фоновый флуктуа-

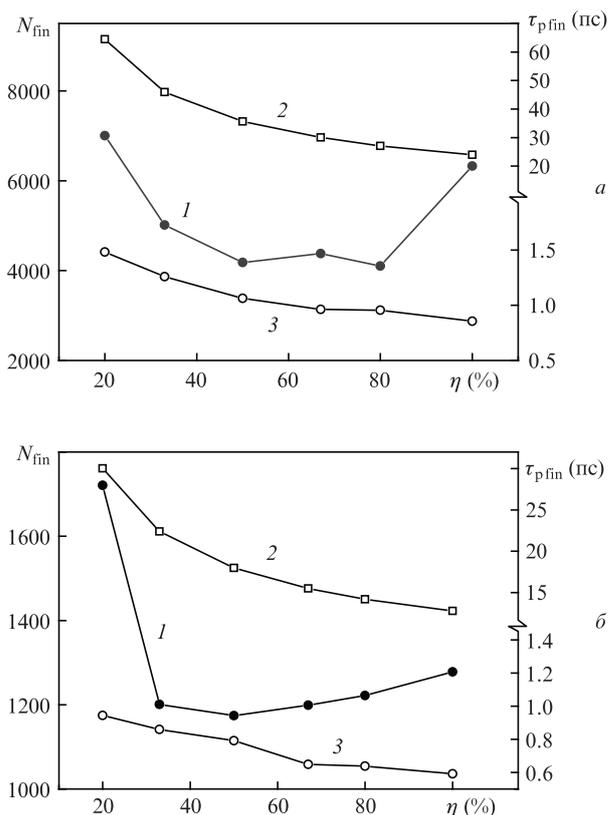


Рис.3. Результаты численного моделирования: число обходов по резонатору, необходимых для перехода в режим синхронизации мод, N_{fin} (1) и длительность импульса $\tau_{p\text{fin}}$ в установившемся режиме с чирпом (2) и без него (3) в зависимости от относительного вклада быстрой и медленной компонент $\eta = \Delta R_{\text{fast}} / (\Delta R_{\text{fast}} + \Delta R_{\text{slow}})$ в релаксацию поглощения при глубине модуляции $\Delta R_0 = 3\%$ (а) и 10% (б).

ционный шум усиливается, потому что потери, обусловленные медленным поглотителем, на заднем фронте развивающегося импульса малы. В конечном счете при чрезмерно большом времени релаксации синхронизация мод становится неустойчивой и достижение устойчивого состояния коротких импульсов возможно только после большого числа обходов по резонатору [1]. Хотя поведение системы при $\Delta R_0 = 3\%$ и 10% (рис.3) качественно схоже, следует отметить положительное влияние глубины модуляции на эффективность уменьшения длительности импульса.

Роль временных характеристик релаксации поглощения проиллюстрирована на рис.4, где относительное уменьшение длительности импульса $\Delta\tau/\tau_p$, происходящее после одного отражения от поглощающего зеркала, отображается в пространстве параметров длительность импульса – энергия. Белый фон двумерного представления соответствует области значений параметров, при которых происходит значительное уменьшение длительности импульса (примерно на 10%). Вычисления проводились для энергий импульса 10–1000 пДж и его длительностей 100 фс–10 нс. Полная глубина модуляции SESAM для всех расчетов остается равной 0.1.

На рис.4,а и б показана эффективность компрессии импульсов в случае поглотителя с единственной экспоненциальной компонентой релаксации, отвечающей либо быстрой, либо медленной динамике соответственно. Сравнение этих рисунков показывает, что при увеличении времени релаксации насыщающегося поглощения эффективное уменьшение длительности импульса происходит для

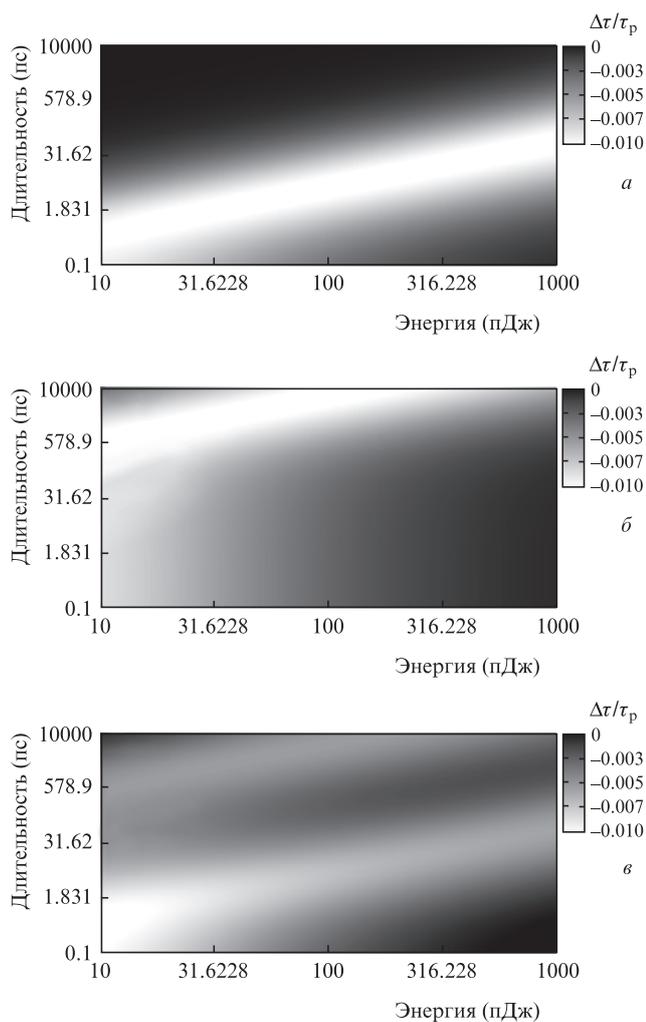


Рис.4. Уменьшение длительности импульса после одного отражения от SESAM при наличии только быстрого ($\Delta R_{\text{slow}} = 0$) (а), только медленного ($\Delta R_{\text{fast}} = 0$) (б) и обоих ($\Delta R_{\text{fast}} = \Delta R_{\text{slow}} = 0.5$) (в) механизмов релаксации. Постоянные времена $\tau_{\text{fast}} = 200$ фс, $\tau_{\text{slow}} = 200$ пс.

более длинных импульсов. Аналогичный эффект наблюдался при увеличении энергии импульса.

Анализ показывает, что единственный механизм релаксации, обуславливающий динамику насыщающегося поглотителя с одной экспоненциальной компонентой, обеспечивает эффективное укорочение импульсов лишь для ограниченных диапазонов энергий и длительностей импульсов, отраженных от поглощающего зеркала. Диапазон ожидаемых устойчивых длительностей импульса (белая область на рис.4,а и б) постепенно сдвигается в сторону

больших значений при увеличении энергии импульса в соответствии с выражением $E_p/E_{\text{sat}} \approx 0.58\tau_p/\tau_{\text{abs}}$, где E_p/E_{sat} – отношение энергии импульса к энергии насыщения поглотителя, а τ_p/τ_{abs} – отношение длительности импульса к времени релаксации поглощения [6]. В частности, это выражение показывает, что затвор с одноэкспоненциальной динамикой релаксации не в состоянии одинаково эффективно формировать длинные и короткие импульсы со сравнимыми энергиями.

Напротив, затвор с быстрым и медленным механизмами релаксации насыщающегося поглощения, имеет расширенный диапазон изменения параметров, в котором происходит эффективное уменьшение длительности импульса (рис.4,в). Видно, что широкий динамический диапазон нелинейного отклика при комбинированной релаксации поглощения обеспечивает формирование импульса для расширенного диапазона его длительностей – от субпикосекунд до наносекунд. Некоторое уменьшение $\Delta\tau/\tau_p$ при отражении от SESAM по сравнению с одноэкспоненциальной динамикой релаксации связано с тем, что вклад в полную глубину модуляции обеих составляющих ($\Delta R_0 = \Delta R_{\text{fast}} + \Delta R_{\text{slow}} = 0.1$) одинаков, и, таким образом, абсолютное значение глубины модуляции каждой компоненты уменьшается.

4. Заключение

В настоящей работе продемонстрировано, что совместное действие быстрого и медленного релаксационных механизмов нелинейного отклика насыщающегося поглотителя имеет значительное влияние на процесс развития синхронизации мод. Анализ комбинированной нелинейной релаксации поглощения, включающей в себя процессы с различной скоростью релаксации, показывает, что такая динамика позволяет получать как надежный режим самостартующей пассивной синхронизации мод, так и эффективную компрессию импульсов. Для оптимального функционирования такого насыщающегося поглотителя каждая компонента его динамической релаксации должна вносить определенный вклад в общий нелинейный отклик.

1. Paschotta R., Keller U. *Appl. Phys. B*, **73**, 653 (2001).
2. Guina M., Xiang N., Vainionpää A., Okhotnikov O.G., Sajavaara T., Keinonen J. *Opt. Lett.*, **26**, 1809 (2001).
3. Shtyrina O., Fedoruk M., Turitsyn S., Herda R., Okhotnikov O. *J. Opt. Soc. Am. B*, **26**, 346 (2009).
4. Haus H.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **12**, 169 (1976).
5. Kärtner F.X., aus der Au J., Keller U. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **4**, 159 (1998).
6. Hakulinen T., Herda R., Okhotnikov O. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **19**, 333 (2007).