

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

Камынин В.А.¹, Фалэ А.Е.^{1,2*}, Федосеев А.И.², Цветков В.Б.¹

¹ Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: fale.ae18@physics.msu.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-227-228

Модуляция излучения лазера, осуществляемая путем размещения в резонаторе модулятора, всегда сопровождается увеличением потерь. По этой причине рассматриваются и альтернативные оптические способы управления, основанные на изменении характеристик активной среды под действием излучения. Так, например, переходы поглощения из возбужденного состояния (ESA), как основа оптического модулятора, исследовались в работах [1-2]. Основная идея модуляции заключается в том, что при оптической накачке происходит возбуждение одного из состояний и сигнал внешнего источника на переходе ESA испытывает поглощение. Ранее нами путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными была определена величина сечения поглощения на резонансном переходе $^5I_7 - ^5I_5$ с $\lambda_t = 1.6$ мкм в активной среде гольмиевого волоконного лазера. Было показано, что поскольку уровень 5I_7 является верхним лазерным, импульсное поглощение на длине волны λ_t может приводить к значительному снижению усиления активной среды за время, близкое к длительности импульса.

В настоящей работе на основе обобщенной модели лазера рассмотрен принцип оптической модуляции, использующий ESA излучения от внешнего источника. Такой принцип успешно применен для гольмиевого волоконного лазера, что подтверждается расчетом с применением подробной модели, адекватность которой проверялась путем сравнения с экспериментальными данными.

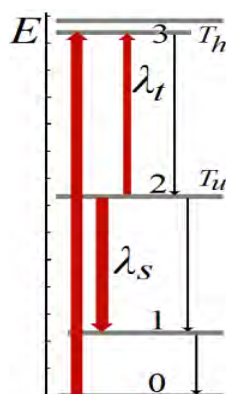


Рис.1. К обобщенной модели лазера. Оптические и релаксационные переходы

В рамках обобщенной модели рассматривается активная среда твердотельного или волоконного лазера, которая содержит высокие уровни с временем жизни $T_h \ll T_u$, где T_u - время жизни верхнего лазерного уровня (см. рис.1). Накачка производится на один из высоких уровней (3), быстрая релаксация заселяет верхний лазерный уровень (2). Лазер работает на переходе (2) – (1) с длиной волны λ_s . Переход ESA с длиной волны λ_t происходит с уровня (2). Быстрая релаксация населенности высокого уровня может восстанавливать «возмущенную» населенность, поэтому разумное время воздействия на среду излучением на переходе ESA T_t ограничено $T_t \approx T_h$. Следовательно, возможности модуляции связаны с периодическим воздействием на активную среду управляющим импульсом. Модель максимально упрощена и характеризуется усредненными по длине активной среды интенсивностями и превышением средней инверсии пороговой величины. Полагается, что возмущения активной среды под действием перехода ESA не затрагивают населенности нижнего лазерного уровня и скорость изменения инверсии зависит от самой инверсии. Используются следующие нормированные уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} w_s(\tau) &= (1/\tau_{ph})[\delta n(\tau) - 1] \cdot w_s(\tau) \\ \frac{d}{d\tau} \delta n(\tau) &= -\delta n(\tau)[w_s(\tau) + \nu_t w_t(\tau)] - \delta n(\tau)/\tau_u + \delta n_p(\tau) + S/\tau_u \\ \frac{d}{d\tau} \delta n_p(\tau) &= -\delta n_p(\tau) + \nu_t \delta n(\tau) w_t(\tau) \end{aligned}$$

Обозначения: τ - время, w_s и w_t - интенсивность генерации (по числу квантов) и внешнего управляющего сигнала соответственно, δn - величина превышения над порогом генерации (нормированная инверсия), δn_p - относительное возмущение инверсии, S - параметр накачки (величина параметра накачки S для стационарно накачиваемой среды при $w_t=0$ равна превышению над порогом δn), τ_u - время релаксации инверсии.

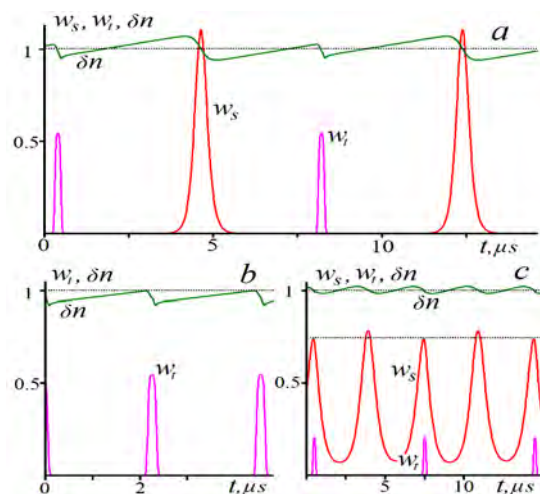


Рис. 2. Управление режимом генерации:
 а) период внешних импульсов $T_i = 7.8$ мкс;
 б) $T_i = 2.2$ мкс; в) импульсы с $T_i = 7.1$ мкс
 пониженной амплитуды

генерации. Для слишком частых управляющих импульсов (малый период) среднее значение инверсии оказывается ниже порога (рис.2б), генерация становится невозможной. В этом случае можно говорить о полном подавлении генерации управляющими импульсами. Для случая, когда w_t столь мало, что полного срыва стационарной генерации уже не происходит, динамика лазера изменяется, реализуются незатухающие релаксационные колебания, насыщающие среду. Такой случай показан на рис. 2с. Принцип периодического подавления релаксационного импульса здесь сменяется другим: внешнее излучение играет роль возмущения, снижающего амплитуду очередного колебания w_s . Частота таких колебаний вдвое выше по сравнению с данными рис.2а.

Для гольмиевого волоконного лазера расчеты проводились с использованием подробной модели, которая включает в себя уравнения переноса излучения и балансные уравнения для населенностей уровней, решаемые в каждой точке среды. Помимо ESA в уравнениях учитываются процессы безызлучательной и излучательной релаксации, переходы кросс-релаксации. Принцип оптического подавления релаксационного импульса был реализован в нескольких вариантах, отличающихся периодом повторения управляющих импульсов T_t . На примере гольмиевого волоконного лазера было показано, что внешний импульсно-периодический источник, работающий как оптический модулятор, использует длину волны, которая значительно больше длины волны генерации. Из-за разницы в длинах волн такой оптический модулятор может оказаться дешевле, а, возможно, и удобнее модуляторов других типов, но работающих «на проход» излучения лазера.

В работе предложена простейшая обобщенная модель, позволяющая качественно описать модуляцию излучения лазера чисто оптическим способом, в котором используется переход вверх из возбужденного состояния. Показано, что можно изменить стационарный режим генерации на импульсно-периодический и обратно или полностью заблокировать генерацию лазера. Тот же способ модуляции реализован в гольмиевом волоконном лазере с использованием подробной модели. Несмотря на то, что модель значительно отличается от обобщенной, сравнение результатов показало возможность использования обобщенной модели для качественного анализа управления динамикой генерации.

Литература

1. C.Li, et al, *Journal of the Optical Society of America B*. **11(8)**, 1356-1360 (1994)
2. T.W.Ebbesen, *Applied Optics*. **25(13)**, 2193-2196 (1986)

На рис. 2 показаны различные варианты модуляции лазерного излучения. Так, период следования управляющих импульсов, близкий к $T_t = 2t_0$ (где t_0 - временной промежуток между срывом генерации за счет действия управляющего импульса и первым релаксационным импульсом), позволяет реализовать импульсно-периодический режим (см. рис.2а), при котором этот период равен периоду следования импульсов генерации T_s (соответствующая частота $\nu_s \approx 67$ кГц). Изменения во времени величины δn показывают, что реализуется принцип периодического оптического подавления релаксационного импульса генерации. Нарастающая за время $\sim t_0$ инверсия, едва преодолев порог, резко снижается вследствие воздействия очередного управляющего импульса, не успевший в полной мере развиваться релаксационный импульс оказывается подавленным. Последующее увеличение δn за счет накачки приводит к возникновению импульса