

УДК 621.378.325

к.т.н. Мурга В. В.,
Мурга Е. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Україна)

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматриваются условия формирования коллективного излучения в активной среде твердотельного лазера. Показано, что способ создания неравновесного состояния активной среды может стимулировать коллективное взаимодействие активных центров, которое влияет на свойства выходного излучения. Приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают возможность формирования коллективного излучения в протяженных средах.

Ключевые слова: *твердотельный лазер, накачка, коллективное излучение, модуляция добротности.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Лазерное излучение представляет собой процесс стимулированного излучения с линейной зависимостью излучения от числа возбужденных частиц над порогом. Детальное рассмотрение процессов возбуждения активной среды позволяет сделать вывод, что усиление люминесценции происходит при превышении порога. И, если при малом усилении активной среды эти потери хоть и небольшие, но существуют, то при большом усилении люминесценция претерпевает усиление в 10^3 и даже большее число раз [1].

Таким образом, при большом превышении порога доминирующим фактором, который определяет потери, принималась усиленная люминесценция. Тем не менее, усиленная люминесценция при определенных условиях приобретает характер коллективного процесса, который можно использовать для увеличения интенсивности генерируемого излучения лазера.

На основании теории Дирака Дике показал [2], что для системы, состоящей из двух атомов, расстояние между которыми меньше длины волны излучения, вероятность спонтанного излучения в два раза больше чем для одного атома, это означает, что время спонтанного распада умень-

шится в два раза по сравнению с обычным случаем.

Это как раз и есть кооперативный эффект в спонтанном излучении, который получил название сверхизлучения (SR). Он усиливается при увеличении числа атомов в системе. Для подобной системы из N возбужденных атомов происходит сокращение спонтанного распада в N раз, то есть время сверхизлучения (SR имеет порядок величины $(N)-1$). Для наблюдения сверхизлучения необязательно, чтобы все атомы находились в возбужденном состоянии, но число атомов в возбужденном состоянии должно превышать число атомов в основном состоянии. То есть система должна быть инвертированной.

Постановка задачи.

Задачей данной работы является исследование процесса формирования коллективного излучения и анализ факторов, которые определяют возможность установления корреляции диполей излучающих активных центров.

Изложение материала и его результаты.

Оценка условий развития генерации показала, что порог для усиленной люминесценции, строго говоря, не существует. Од-

нако, в інвертированній середі посиленна люмінесценція стає переважаючим механізмом релаксації для активної середі. Потужність посиленої люмінесценції швидко збільшується з інверсією населенностей приблизительно як

$$P = P_0 \frac{[\exp(\sigma_0 N_2 l)]}{(\sigma_0 N_2 l)}, \quad (1)$$

де σ_0 — сечення поглинання активно-го центра; N_2 — різниця населенностей лазерних рівнів, l — довжина активної середі.

Під дією зовнішнього поля накачки активна середі отримує поляризацію об'єму

$$PV = \frac{3}{4\pi} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} E_{\text{вн}}^2 V. \quad (2)$$

При цьому діелектрична проникність середі залежить від співвідношення власних частот коливань окремих диполів і частоти зовнішнього поля $E_{\text{вн}}$:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2 - \omega_0^2}, \quad (3)$$

$$\omega_c^2 = - \frac{8\pi d^2 \omega_0 \Delta N}{\eta}, \quad (4)$$

де ω_c — кооперативна частота; ω_0 — частота переходу; ΔN — різниця населенностей рівнів; d — дипольний момент окремого атома.

При наближенні зовнішньої частоти поля до резонансної частоти ω_0

$$\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0 \left(1 + \frac{\omega_c^2}{6\omega_0^2} \right) \quad (5)$$

стають можливими власні коливання поляризації в шарі, які можуть існувати навіть при відсутності зовнішнього електричного поля. В цьому випадку густина електромагнітної енергії в образці:

$$W = \frac{E_0^2}{16\pi} \frac{d(\omega\varepsilon)}{d\omega} + \frac{H_0^2}{16\pi} \approx \frac{E_0^2}{8\pi} \frac{9\omega_0^2}{\omega_c^2}. \quad (6)$$

Таким чином основна частина енергії зосереджена в коливаннях поляризації зразка, а не в електричному полі $|W| \gg E_0^2 / (8\pi)$. Довжина імпульсу

$\tau = \frac{1}{2\gamma_0}$, де γ_0 — інкремент, відповідний інверсії ΔN_0 в початковий момент часу $t = 0$. Час затримки $t_3 = \tau \ln(4Q_{\text{max}} / Q_0)$, де Q_0 — початкова, а

$Q_{\text{max}} = \frac{\eta\omega_0}{4T_1} (V\Delta N)^2$ — максимальна потужність випромінювання. Якщо потужність Q_0 дорівнює потужності некогерентного спонтанного випромінювання $\frac{\eta\omega_0 V \Delta N_0}{T_1}$, то затримки скла-

дуть $t_3 = \tau \ln(V\Delta N_0)$.
Поэтому основний інтерес представляють, звичайно, зразки більшого розміру $L \gg \lambda$, що представляє практичний інтерес. В зразках більшого розміру можуть поширюватися електромагнітні хвилі, які в інвертированній двурівневої середі мають специфічними властивостями. Якщо густина інвертированих атомів відносно невелика, то ці властивості чітко не проявляються і в такому зразку реалізується режим, характерний для імпульсних лазерів і мазерів. Однак при високій густині ΔN в умовах, коли реалізується нерівність $\gamma T_2 \gg 1$, поряд з звичайними електромагнітними хвилями в безмежній середі поширюються так звані хвилі поляризації, які мають енергію, яка зосереджена в коливаннях поляризації (а не електричного поля, енергія якого відносно мала). Як показано в [3], в інвертированих зразках з відбиваючими стінками ці хвилі утворюють поляритонні моди, локалізовані всередині зразка. І нарешті, якщо стінки зразка мають коефіцієнт відбиття

$R < 1$, то поляритонные моды выходят за его границы, но уже в виде электромагнитной волны.

Одним из вопросов, который остается в состоянии изучения, является возбуждение поляризационных колебаний и сохранение их достаточно длительное время. В работе [4] показано, что частота поляризационных колебаний существенно отличается от частоты рабочего лазерного перехода. Это позволяет сделать предположение о длительном поддержании поляризационных колебаний и сохранении коррелированного состояния излучающих диполей за счет спин-решеточного взаимодействия. Данное предположение позволило сформулировать требования к возбуждающему импульсу накачки, который позволил бы обеспечить поляризационные колебания с высокой добротностью.

В эксперименте использовалась импульсно-периодический режим возбуждения, форма которого представлена на рисунке 1.

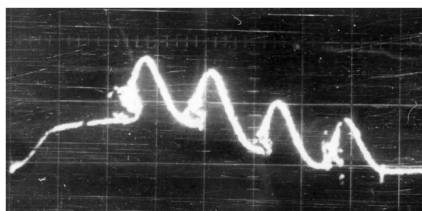


Рисунок 1 — Оциллограмма токового импульса накачки. Цена деления по горизонтали – 20 мкс.

Исследование релаксационных свойств возбужденной системы проводилось путем включения добротности с различной задержкой после достижения максимума инверсии активной среды. Выходная энергия генерации отображает величину превышения инверсии над порогом. На рисунке 2 показана зависимость энергии генерации от задержки включения добротности резонатора. Скорость падения энергии генерации позволяет оценить релаксационные характеристики возбужденной активной среды.

Как видно из рисунка 2 наиболее рациональным режимом с точки зрения эффективности преобразования энергии является включение добротности резонатора в максимуме инверсии [5, 6].

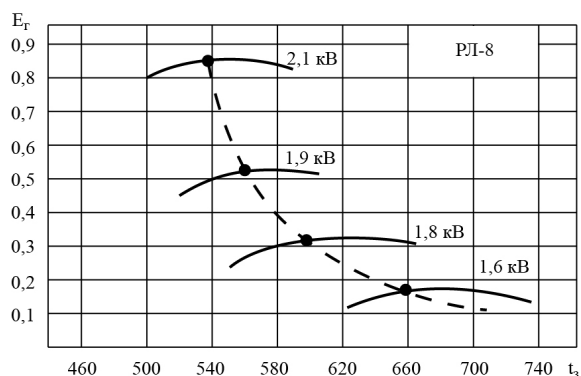


Рисунок 2 — Экспериментальные зависимости величины выходной энергии моноимпульса от времени задержки включения затвора для кристалла рубина РЛ 8.

Для снижения потерь на усиленную люминесценцию необходимо сократить время, в течение которого активная среда пребывала бы в состоянии с максимальным коэффициентом усиления. В данном случае для снижения потерь на усиленную люминесценцию и использовался импульс накачки с протяженным подготовительным воздействием, которое обеспечивает возбуждение до порога и далее интенсивное периодическое воздействие, как показано на рисунке 1.

На фоне представленных данных интересным эффектом сопровождается возбуждение активной среды сложным импульсом накачки, когда на подготовительный протяженный импульс накладывается серия коротких интенсивных пиков. В данном случае наблюдается увеличение интенсивности генерируемого излучения при определенной частоте повторения интенсивных пиков (рис. 3).

Отмечено возрастание выходной интенсивности при совпадении периода следования интенсивных пиков и периода поляризационных колебаний возбужденных

диполей. При этом инверсия активной среды заметно снижается.

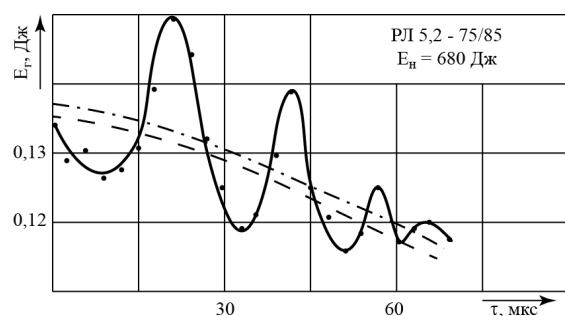


Рисунок 3 — Зависимость выходной энергии моноимпульса от времени задержки включения добротности при различных режимах возбуждения (нижняя гладкая кривая — «гладкий» импульс накачки, периодическое изменение интенсивности моноимпульса соответствует сложной накачке)

Полученный результат подтверждает то, что интенсивное периодическое воздействие на инвертированную систему может приводить к изменению характеристик фазовой релаксации активных цен-

тров в присутствии резонансного поля возбуждения.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Предложенный способ возбуждения активной среды обеспечивает увеличение интенсивности генерируемого излучения при инверсии ниже, чем с традиционной «гладкой» накачкой. Это подтверждает наличие коллективного излучения в системе.

Этот эффект очень важен для электроники больших мощностей, где в ряде прикладных задач основные усилия направлены на получение мощных и коротких импульсов (например, для радиолокации). Эти режимы исследовались экспериментально и теоретически, но, как правило, в условиях, аналогичных мазерным режимам в квантовой электронике. Однако режим сверхизлучения позволяет в принципе получить более короткие и мощные импульсы. Это и объясняет привлекательность идеи поиска коллективного излучения в классической электронике.

Библиографический список

1. Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ. — 3-е перераб. и доп. изд. — Москва: Мир, 1990. — 560 с.
2. Dicke R. H. // *Phys. Rev.* 1954. — V. 93. — P. 99.
3. Железняков В. В., Кочаровский В. В., Кочаровский В. В. // *ЖЭТФ*. — 1984. — Т. 87. — С. 1565.
4. Мурга В. В. Формирование макродиполя в активной среде твердотельных лазеров / В. В. Мурга., Е. В. Мурга // *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В.Даля*. — Луганськ. — 2011. — № 8 (162) Ч. 2. — С.146–149.
5. Yu. A. Anan'ev. Amplification of light by four-level quantum systems // *SOVIET PHYSICS JETP*, 1965. — VOLUME 21, NUMBER 1 JULY. — P.4–8.
6. Денищик Ю. С. Учет взаимного влияния инверсной заселенности и плотности люминесценции при оценке энергетической эффективности накачки трехуровневой среды в нестационарном режиме / Ю. С. Денищик // *Журнал прикладной спектроскопии*. — 1988. — Т. 51. — № 5. — С. 777–781.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонДТУ Мочалиным Е. В., д.т.н., проф. ВНУ им. Даля Корсуновым К. А.

Статья поступила в редакцию 23.06.14.

к.т.н. Мурга В. В., Мурга О. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)
УМОВИ ФОРМУВАННЯ КОЛЕКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Розглядаються умови формування колективного випромінювання в активному середовищі твердотільного лазера. Показано, що спосіб створення нерівноважного стану активного середовища може стимулювати колективна взаємодія активних центрів, що впливає на властивості вихідного випромінювання. Наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують можливість формування колективного випромінювання в протяжних середовищах.

Ключові слова: *твердотільний лазер, накачування, колективне випромінювання, модуляція добротності.*

Murga V. V. Candidate of Engineering Sciences, Murga E. V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

CONDITIONS OF COLLECTIVE RADIATED EMISSION FORMATION

Conditions of collective radiated emission formation in active environment of solid laser are considered. The way of nonequilibrium of active environment can stimulate collective interaction of active centres that influence on the output emission properties shown in the article. The results of the experimental investigation that confirm the possibility of collective radiated emission formation in extended environment are given.

Key words: *solid lasers, complex impulse, collective radiated emission, Q modulation.*