

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАЗЕРА НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

*В.Г. Колобродов<sup>1</sup>, Е.В. Мурга<sup>2</sup>, В.В. Мурга<sup>2</sup>, И.И. Антропов<sup>3</sup>, Д.К. Гамазин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный технический университет Украины КПИ, Киев, Украина;*

<sup>2</sup>*Донбасский государственный технический университет, Алчевск, Украина*

*E-mail: murga@ukr.net; тел. +38(06442)235-22, факс +38(06442)268-87;*

<sup>3</sup>*Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия*

*E-mail: i.antropov@yahoo.com; тел. +7982-364-3228*

Исследуется влияние режима возбуждения твердотельного лазера на пространственное распределение интенсивности излучения. Показано, что способ создания неравновесного состояния активной среды может стимулировать коллективное взаимодействие активных центров, которое влияет на свойства выходного излучения. Приводятся данные, указывающие на уменьшение расходимости генерируемого излучения и более равномерное распределение интенсивности в поле излучения лазера при сложнопериодическом возбуждении активной среды. Полученные эффекты дают возможность увеличить дальность систем дистанционного зондирования. При использовании подобного возбуждения улучшается качество обработки материалов.

### ВВЕДЕНИЕ

Когерентное излучение лазера находит все большее применение в различных отраслях науки и техники. В системах лазерного зондирования используются твердотельные лазеры, позволяющие получить в моноимпульсном режиме очень высокие значения мощности. Однако свойства формируемого когерентного излучения существенно зависят от способа возбуждения и характера релаксации активных центров лазеров. На свойства генерируемого излучения существенное влияние оказывает взаимодействие возбужденных активных центров. Особенно это заметно в системах с упорядоченным расположением частиц, что соответствует кристаллическим активным средам, примером которых являются рубин и иттрий-алюминиевый гранат. Эти материалы наиболее часто используются для построения источников излучения систем дистанционного зондирования и лазерных локационных систем. Поэтому любые улучшения параметров излучения этих лазеров представляют собой актуальную задачу.

В [1] показано, что релаксационные характеристики отдельных атомов и системы частиц значительно отличаются. При этом, если в верхнем энергетическом состоянии в первоначальный момент наблюдалась инверсия, то излучение принимало форму кооперативного процесса, в котором излучение одного атома влияет на излучение других атомов. Данный процесс может приводить к сверхизлучению [2], отличающемуся более высокой степенью направленности, чем обычное лазерное, и расходимость близка к дифракционному пределу.

В исследованиях отмечено, что при сложнопериодическом возбуждении лазера генерируемое излучение представляет собой сумму стимулированного и коллективного излучений частиц, диполи которых находятся в коррелированном состоянии. Поскольку коллективное излучение обладает более высокой направленностью [3], то суммарное

выходное излучение может иметь меньшую расходимость, чем стимулированное при генерации с традиционным возбуждением.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Настоящая работа посвящена анализу метода возбуждения твердотельного импульсного лазера, который позволяет возбудить в активной среде коллективные взаимодействия и, тем самым, обеспечить пространственное перераспределение интенсивности выходного излучения лазера с более равномерным профилем.

### АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ИНВЕРТИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Процесс релаксации активной среды может происходить по нескольким каналам: обычная и усиленная люминесценции; суперлюминесценция и сверхизлучение. Люминесценция и усиленная люминесценция не имеют порога и характеризуют релаксацию системы активных центров лазерной среды с самого начала процесса возбуждения. Временные характеристики люминесценции соответствуют общепринятым значениям. Вклад усиленной люминесценции возрастает по мере роста числа возбужденных частиц. При достижении инверсии, т.е. такого состояния активной среды, когда коэффициент усиления достаточно большой, этот вид релаксации становится преобладающим. Чем выше уровень усиления активной среды, тем быстрее происходит распад возбужденного состояния [4]. На рис. 1 показана зависимость энергии генерации от задержки включения добротности резонатора. Скорость падения энергии генерации позволяет оценить релаксационные характеристики возбужденной активной среды.

Анализ полученных результатов показал, что при большом превышении порога наблюдаются значительные изменения релаксационных характеристик.

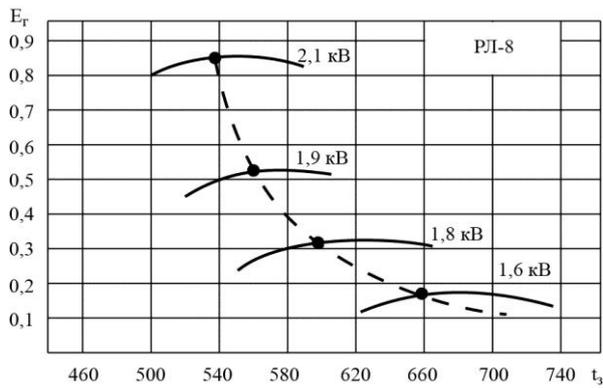


Рис. 1. Зависимость величины выходной энергии моноимпульса от времени задержки включения затвора для кристалла рубина РЛ 8

В данном случае время релаксации возбужденного состояния уменьшается более чем на порядок по сравнению с общепринятыми значениями. Полученные экспериментальные данные хорошо коррелируют с данными теоретических оценок, которые приводятся в [5, 6]. Отличие от табличных данных обусловлено тем, что данные, которые получены ранее, основываются на измерениях интенсивности люминесценции лазерных сред при низких уровнях возбуждения, когда эффект усиления люминесценции практически отсутствует. Особое значение изменение релаксационных процессов приобретает при моноимпульсном режиме генерации, когда коэффициент усиления достигает больших значений. При расчетах лазеров принято считать, что опустошение верхних энергетических состояний происходит путем излучательных или безызлучательных переходов с характерными временами, которые свойственны одиночному атому. Время жизни в возбужденном состоянии характеризует длительность люминесценции. Данный подход не учитывает взаимодействия активных частиц с полем излучения.

Релаксация инвертированной системы, имеющая высокий коэффициент усиления, может происходить по различным каналам. Помимо обычной люминесценции в инвертированной системе может происходить усиление люминесценции, стимулированное и коллективное излучения. Все эти процессы протекают при взаимодействии с полем излучения и существенно влияют на значение времени релаксации. Таким образом, посредством поля можно влиять на релаксационные характеристики активной среды и параметры излучательного процесса.

Люминесценция возникает при нарушении термодинамического равновесия в системе активных центров и начинается при малейшем возбуждении. Когда усиление активной среды становится больше 1, возникает усиленная люминесценция, которая является преобладающим процессом при превышении пороговых условий генерации лазера. При большом усилении люминесценция претерпевает усиление в  $10^3$  и даже большее число раз [3].

Генерация лазера, представляющая собой стимулированное излучение, возникает при условии, что потери в резонаторе компенсируются усилением в активной среде (пороговое условие):

$$\exp(2lk_{II} - \sigma) R_1 R_2 \geq 1 \quad (1)$$

или

$$\delta = \left( N_2 - \frac{g_B}{g_H} N_1 \right)_{II} = \frac{c \Delta v_{II} \left( \sigma + \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right)}{gnh v_r B_r 2l}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – пороговая инверсия населенности;  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты отражения зеркал резонатора;  $l$  – длина стержня;  $\sigma$  – потери в резонаторе на двойном проходе, связанные с добротностью резонатора  $Q$  соотношением

$$Q = \frac{v_r}{\Delta v_p} = \frac{4\pi l v_r}{c \left( \sigma + \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right)}. \quad (3)$$

В то же время в коллективе возбужденных активных центров может происходить самокорреляция излучающих диполей. При достижении пороговых условий система стремится к состоянию, при котором излучение отдельных частиц коррелировано между собой, причем корреляция вызывается спонтанным излучением. В [7] показано, что при коррелированном состоянии критического числа частиц система стремится к самоорганизации. Излучение системы активных центров, находящихся в коррелированном состоянии, носит характер коллективного излучения. Следует отметить, что в протяженных системах объем, занимаемый частицами с коррелированным состоянием диполей, ограничен областью взаимодействия, величина которой соизмерима с длиной волны излучения. Таким образом, возникает нитевидная структура излучения коррелированных частиц. Эти заключения соответствуют выводам [9]. Образование этих нитей хаотично. Наиболее благоприятным режимом можно было считать режим с согласованным излучением этих нитей. Такое состояние активной среды могло бы привести к образованию макродиполя [8] и приобретению излучением новых свойств – меньшей расходимости излучения и большей интенсивности.

Реализации такого режима и посвящено данное исследование.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе исследований получены результаты, указывающие на то, что установлению когерентных состояний способствуют колебания, частота которых на несколько порядков ниже, чем частота генерируемого излучения. В этом случае взаимное влияние активных центров обусловлено магнитодипольным взаимодействием. Поэтому фазы прецессии дипольных моментов могут синхронизироваться через поперечное поле [8]. Спустя время задержки  $t_0$  система самопроизвольно переходит в сверхизлучающее когерентное состояние со сфазированными диполями:

$$t_0 \approx \frac{T_1 \ln(N\lambda^2/S)}{N\lambda^2/2S}, \quad (4)$$

где  $T_1$  – время продольной релаксации (время жизни в возбужденном состоянии);  $\lambda$  – длина волны излучения;  $N$  – число частиц в возбужденном состоянии;  $S$  – площадь поперечного сечения образца.

В ряде работ [10, 11] указано, что в протяженных системах форма сигнала коллективного излучения (КИ) деформируется и приобретает осцилляции, частота которых связана с релаксационными характеристиками данных активных центров:

$$\Omega = \left[ \frac{2R_0}{T_0^2} - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{T_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где  $R_0 = -N \left( 1 - \frac{2}{\mu L} \right)$ ;  $\mu = \frac{\lambda^2 N T_2}{4\pi V T_1}$ ;  $T_2$  – время

фазовой релаксации;  $\tau = \frac{L}{c}$ .

При возмущении активной среды с периодом, кратным величине  $\frac{1}{\Omega}$ , можно ожидать увеличения интенсивности числа коллективизированных частиц и возрастания доли коллективного излучения. Если учесть, что коллективное излучение имеет расходимость меньшую, чем обычное генерируемое излучение

$$\Omega = \frac{\pi D^2}{16l^2} [3], \quad (6)$$

то общая картина распределения генерируемого излучения должна измениться. Диаграмма направленности выходного излучения лазера станет уже.

Представленные соображения были учтены при проведении эксперимента. В качестве исследуемого объекта использовались лазеры на рубине и гранате с диаметром активного элемента 8 мм и длиной 100 мм. Накачка производилась импульсными лампами со сложным токовым импульсом (рис. 2).

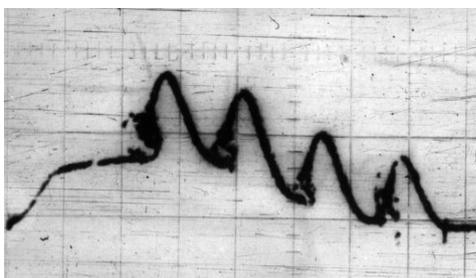


Рис. 2. Осциллограмма токового импульса накачки. Цена деления по горизонтали – 20 мкс

Как видно из осциллограммы, предварительный протяженный импульс приводил активную среду в инвертированное состояние, которое соответствовало порогу генерации. После этого среда подвергалась коротким интенсивным воздействиям с определенной периодичностью. Изменение добротности резонатора обеспечивалось электрооптическим затвором, включающимся после

последнего пика через время, равное периоду следования пиков.

При периоде следования пиков порядка 30 мкс выходное излучение заметно изменяло интенсивность и расходимость. На рис. 3 показаны отпечатки интенсивности излучения при «гладкой» и «комбинированной» накачках.

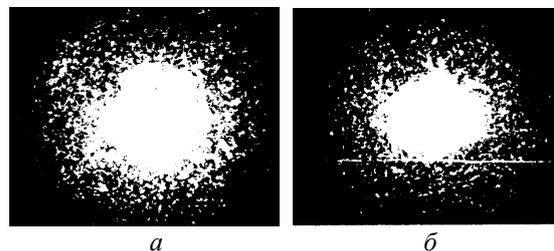


Рис. 3. Распределение поля излучения лазера в фокальной плоскости длиннофокусной линзы. Масштаб 100:1; «гладкая» (а) и «комбинированная» накачка (б)

Отпечатки получены на фоточувствительной бумаге методом фокального пятна при использовании длиннофокусной линзы. Количественная оценка по уровню интенсивности показала, что расходимость по полуширине уменьшилась в 1,4 раза. Это свидетельствует об увеличении доли коллективного излучения при возбуждении активной среды сложным импульсом накачки. Оценка распределения интенсивности по сечению активного элемента показала более равномерное распределение (рис. 4).

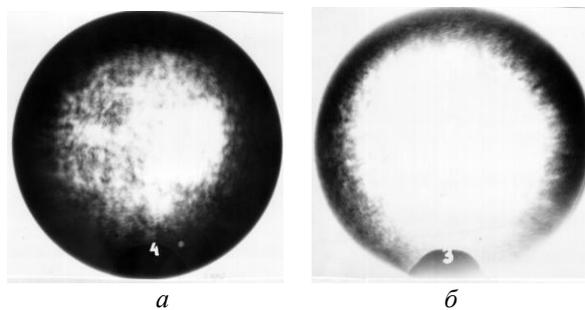


Рис. 4. Распределение интенсивности по сечению активного элемента при «гладкой» (а) и «комбинированная» накачках (б) при  $E_n \cong 720$  Дж

Следует отметить, что коллективное излучение обусловлено синфазным (т. е. коррелированным) состоянием излучающих диполей. Возможность получения такого излучения в протяженных системах подтверждает то, что релаксационные характеристики активных центров существенно изменяются, особенно, если сильно взаимное влияние частиц. В данном случае фазовая корреляция поддерживается внешним периодическим воздействием, которое кратно периоду осцилляций коллективного излучения.

Представленное свойство излучения при «комбинированной» накачке успешно используется при обработке поверхности материалов. Выравнивание интенсивности излучения позволяет улучшить качество обработанной поверхности по схеме, показанной на рис. 5.

Неравномерное распределение интенсивности приводит к образованию каверн и существенно изменяет механические свойства на участках, где отмечена максимальная интенсивность излучения. Необходимо отметить, что картина распределения от импульса к импульсу не повторяется. Примеры каверн показаны на рис. 6.

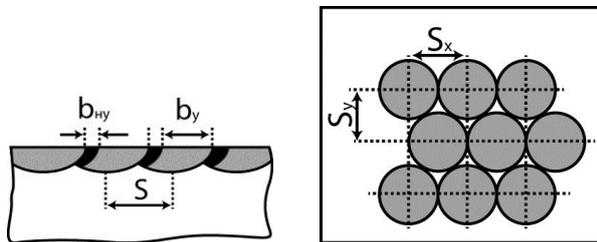


Рис. 5. Схема обработки поверхности деталей при импульсном режиме генерации

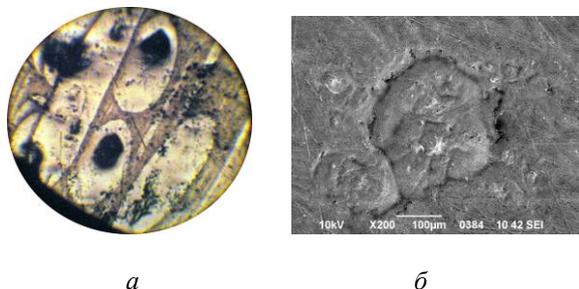


Рис. 6. Образование каверн при большой неравномерности распределения интенсивности по сечению пучка лазерного излучения (а); снимок каверны с помощью растрового электронного микроскопа (б)

Используя режим возбуждения с «комбинированной» накачкой (см. рис. 4,б), можно получить довольно равномерное заполнение пучка лазерного излучения. Использование такого режима дает возможность получения участков с модифицированным слоем без механических нарушений и хорошими эксплуатационными свойствами.



Рис. 7. Обработанные участки при равномерном распределении интенсивности излучения в лазерном пучке

Обработанные участки имеют более светлый оттенок и не поддаются травлению. Исследование микротвердости обработанных участков показало возрастание твердости в 2,5 раза по сравнению с необработанной поверхностью (рис. 7),

коррозионная активность поверхности, при этом, уменьшилась в 1,5 раза.

## ВЫВОДЫ

1. Увеличение доли коллективного излучения при возбуждении активной среды «комбинированным» импульсом накачки подтверждается сужением диаграммы направленности генерируемого излучения.

2. Показано, что периодическое внешнее воздействие на инвертированную систему может приводить к установлению коррелированного состояния диполей излучающих активных центров, что вносит изменения в привычную трактовку параметров фазовой релаксации.

3. Результаты исследований указывают на значительное уменьшение времени релаксации возбужденного состояния при большом превышении порога генерации. Это обусловлено усилением спонтанного излучения при высоком коэффициенте усиления среды.

4. Получены результаты в оптическом диапазоне электромагнитного излучения, которые позволяют говорить о возможности получения коллективного излучения в более коротковолновом диапазоне, поскольку управляющее воздействие имеет частоту на несколько порядков ниже частоты генерации.

5. Использование данного режима возбуждения активной среды лазерных систем для обработки материалов позволяет повысить качество обрабатываемой поверхности и эксплуатационные характеристики деталей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. М.М. Альперин, Я.Д. Клубис, А.И. Хижняк. *Введение в физику двухуровневых систем*. Киев: «Наукова думка», 1987, 224 с.
2. R.H. Dicke // *Phys. Rev.* 1954, v. 93, p. 99.
3. О. Звелто. *Принципы лазеров* / Пер. с англ. М.: «Мир», 1990, 560 с.
4. В.В. Мурга, О.В. Мурга, В.Г. Колобродов. Зниження рівня підсиленої люмінесценції при імпульсному режимі генерації // *Наукові вісті НТУУ КПІ*. 2013, №5, с. 103-106.
5. Yu.A. Anan'ev. Amplification of light by four-level quantum systems // *Soviet Physics JETP*. 1965, v. 21, N 1, p. 4-8.
6. А.А. Мак, Ю.А. Ананьев, Б.А. Ермаков. Твердотельные оптические квантовые генераторы // *УФН*. 1967, т. 92, в. 3, с. 373-425.
7. Д.Н. Маковецкий. Резонансная дестабилизация микроволнового индуцированного излучения фоонов в акустическом квантовом генераторе (фазере) при периодической модуляции накачки // *ЖТФ*. 2004, т. 74, в. 2, с. 83-91.
8. А.В. Андреев, Ю.А. Ильинский, В.И. Емельянов. Коллективное спонтанное излучение // *УФН*. 1980, т. 131, №4, с. 653.
9. В.И. Емельянов, В.И. Юкалов. Образование нитей инверсии в лазерных средах вследствие межатомных взаимодействий через поле переизлучения // *Оптика и спектроскопия*. 1986, т. 60, с. 634-636.

10. C.T. Lee. Transition from incoherence to coherence in the spontaneous emission of extended system // *Ibid.* 1976, v. 13, N 4, p. 1657-1659.

11. A. Crubellier, S. Liberman, D. Mayon, et al. Oscillations in superradiance with long-duration pumping pulses // *Opt. Lett.* 1982, v. 7, N 1, p. 16-18.

*Статья поступила в редакцию 30.01.2015 г.*

## **ВПЛИВ РЕЖИМУ ЗБУДЖЕННЯ ЛАЗЕРА НА ПРОСТОРОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПРОМІНЮВАННЯ**

*В.Г. Колобродов, О.В. Мурга, В.В. Мурга, І.І. Антропов, Д.К. Гамазин*

Досліджується вплив режиму збудження твердотілого лазера на просторовий розподіл інтенсивності випромінювання. Показано, що спосіб створення нерівноважного стану активного середовища може стимулювати колективна взаємодія активних центрів, що впливає на властивості вихідного випромінювання. Наводяться дані, що вказують на зменшення розходимості генерованого випромінювання і більш рівномірного розподілу інтенсивності в полі випромінювання лазера при складноперіодичному збудженні активного середовища. Отримані ефекти дають можливість збільшити дальність систем дистанційного зондування. При використанні подібного збудження поліпшується якість обробки матеріалів.

## **INFLUENCE OF LASER EXCITATION ON THE SPATIAL CHARACTERISTICS OF THE RADIATION**

*V.G. Kolobrodov, O.V. Murga, V.V. Murga, I.I. Antropov, D.K. Gamazin*

The paper examines the impact of the excitation mode of solid-state laser on the spatial distribution of the radiation intensity. It is shown that the process of the active medium non-equilibrium state creating can stimulate collective interaction of active sites, which effects on the properties of the output radiation. The data indicates a decrease of the divergence and more uniform intensity distribution of laser radiation field, which is generated under the complex periodic excitation of the active medium. Effects obtained allow empowering of remote sensing systems. The treatment quality can be significantly increased using such effects for material processing.