

*д. т. н., проф. Денищик Ю.С.,  
аспирант Любич И. В.  
(ГМЦ «Орион» ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛАЗЕРНЫХ АКТИВНЫХ СРЕДАХ ДЛЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ ЛЛС**

*У статті обґрунтована необхідність дослідження енергетичної ефективності активних середовищ передавачів лазерно-локаційних станцій. Запропонована теоретична модель для чотирьохрівневих активних середовищ з використанням результатів, що були отримані раніше для трьохрівневого активного середовища (рубін). Наведена порівняльна оцінка енергетичної ефективності накачування стержнів з рубіну та гранату. Подані рекомендації щодо використання лазерів на відповідних активних середовищах.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Современные лазерно-локационные станции (ЛЛС) позволяют определять расстояния до космических объектов с точностью до единиц сантиметров при дальности в десятки тысяч километров.

Возможности локационной станции главным образом обусловлены характеристиками передатчика [1]. В передающих устройствах импульсных некогерентных ЛЛС в основном используются твердотельные лазеры на трех и четырехуровневых активных средах.

Преимущественное использование данных типов лазеров обусловлено сравнительно высоким временем жизни частиц метастабильного уровня ( $10^{-5}..10^{-2}$  с) и высокой концентрацией активных носителей в единице объема ( $10^{19}$  см<sup>-3</sup>). Это позволяет накапливать в активных элементах лазеров значительную энергию с последующим излучением оптического импульса высокой мощности ( $10^{10}$  Вт).

### **Постановка задачи.**

Необходимо отметить, что потери в активном элементе лазера одни из самых значительных. Целесообразен поиск оптимального по КПД режима работы лазера при котором эффективность активной среды была бы максимальна. Для того, чтобы оценить энергетическую эффективность режима работы лазера, необходимо дать количественную оценку преобразования энергии накачки. В связи с

этим представляет интерес разработка теоретической модели, приемлемой для оперативных оценок преобразования энергии с учетом усиления люминесценции в активных элементах твердотельных лазеров с накачкой оптическими импульсами.

#### **Анализ последних достижений и публикаций.**

За основу взята теоретическая модель для трехуровневых активных сред, приведенная в работе [2], которая была дополнена учетом нелинейной зависимости плотности люминесценции и инверсии населенности [3], также были учтены коэффициенты отражения от торцов стержня [4]. В указанных работах при изучении энергетической эффективности исследовалась трехуровневая активная среда на примере рубина. Представляет интерес выполнение подобного анализа для лазеров на четырехуровневых активных средах, преимущественно, на YAG:Nd.

Для определения условий, при которых наиболее эффективно используется накачка трехуровневых и четырехуровневых сред, проведены расчеты для стержней рубина и граната с одинаковыми габаритами (длина стержня 8 см). Кроме габаритов и коэффициентов, отражающих физические свойства активного тела, в модели используются относительные величины: приведенная энергия импульса накачки и длительность относительно времени жизни частиц на метастабильном уровне. Такой подход упрощает анализ результатов.

#### **Изложение материала с обоснованием полученных результатов.**

Энергетические процессы, происходящие в активном теле лазера, описываются исходя из уравнений баланса населенностей уровней. В процессе создания инверсии населенности и усиления среды важна разность концентраций основного и метастабильного уровней. Выражения для населенностей метастабильных уровней ( $n_2, n_3$ ) определены с учетом пренебрежения вероятностями неоптических и неосновных переходов [5].

Основой модели является целевая функция  $\phi$ , прямо пропорциональная энергии излучения лазера и обратно пропорциональная потерям энергии на суперлюминесценцию за время действия импульса накачки. Запасенную средой энергию характеризует кратность  $K$  превышения населенности метастабильного уровня над пороговой.

В таблице 1 приведены основные формулы, использованные для определения энергетических эффективностей двух типов активных сред.

Таблица 1 – Основные формулы для расчета энергетической эффективности трехуровневых и четырехуровневых активных сред.

Трехуровневая активная среда	Четырехуровневая активная среда
$\frac{n_2}{n} = \frac{E}{E + \tau_u / T_{21}} \left[ 1 - e^{-\frac{(E + \tau_u / T_{21}) t}{T_{21}}} \right]$	$\frac{n_3}{n} = E \frac{T_{32}}{\tau_u} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{T_{32}}} \right]$
$k_{21}bl = \frac{(k_{21})_0 bl}{1 + a \frac{\chi_{21} - (k_{21})_0}{\chi_{21}} \cdot \frac{\chi_{21} + (k_{21})_0}{k_{21}} \cdot \left[ 1 - \frac{(1-r)(1-e^{-k_{21}bl})}{k_{21}bl(1-re^{-k_{21}bl})} \right]}$	$k_{32}bl = \frac{(k_{32})_0 bl}{1 + 2a\sigma \frac{\chi_{32} - (k_{32})_0}{\chi_{32}} \cdot \left[ 1 - \frac{(1-r)(1-e^{-k_{32}bl})}{k_{32}bl(1-re^{-k_{32}bl})} \right]}$
$P_{cl} = a \frac{\chi_{21} + k_{21}}{k_{21}} \left[ \frac{1-r}{k_{21}bl} \frac{e^{k_{21}bl} - 1}{1 - re^{k_{32}bl}} - 1 \right]$	$P_{cl} = 2a \left[ \frac{1-r}{k_{32}bl} \frac{e^{k_{32}bl} - 1}{1 - re^{k_{32}bl}} - 1 \right]$
$\Delta_k = \Delta_0 + \Delta_n \ln \frac{\Delta_k}{\Delta_0}$	
$K = \frac{\Delta_0}{\Delta_n}$	
$\phi = \frac{\Delta_0 - \Delta_k}{\Delta_n} \cdot \frac{t_u}{\int_0^{t_u} P_{cl} dt}$	

где  $n_2, n_3$  - населенности уровней;  
 $\chi$  - предельный коэффициент усиления;  
 $k_0$  - максимально возможное значение коэффициента усиления при данной накачке;  
 $r$  - коэффициент отражения от торцов стержней;  
 $K$  - кратность перенаселенности метастабильного уровня;  
 $\Delta_k$  - значение перенаселенности, которое устанавливается в активной среде сразу после излучения;  
 $\Delta_n$  - пороговое значение перенаселенности;  
 $P_{cl}$  - мощность, затрачиваемая на усиление люминесценции;  
 $\Delta_0$  - значение начальной перенаселенности активной среды на момент  $t = \tau_u$ , до генерации моноимпульса лазера;  
 $T_{21}, T_{32}$  - время жизни возбужденного состояния.

С помощью предложенной теоретической модели можно найти наиболее энергетически выгодные режимы работы лазеров. Данная

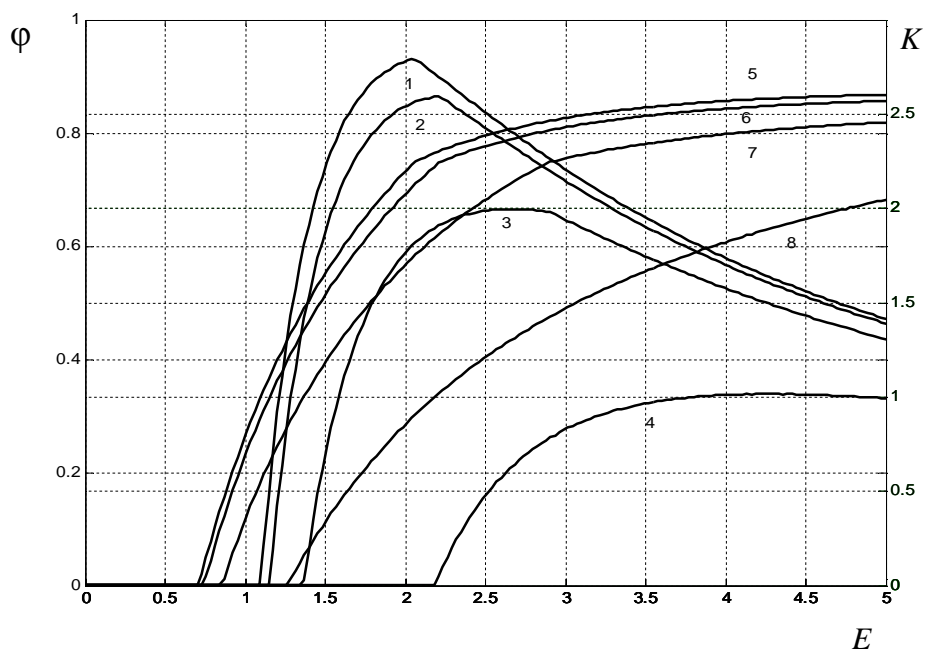
модель дает возможность проследить процессы накопления частиц на метастабильном уровне, излучения энергии, а также наглядно представляет изменение потерь, затрачиваемых на люминесценцию и ее усиление, в зависимости от параметров импульса накачки.

На рис. 1 показаны графики зависимостей показателя  $\varphi$  и кратности  $K$  перенаселенности метастабильного уровня от приведенной энергии  $E$  накачки для трех- и четырехуровневых активных сред. Как видно, целевая функция обеих сред стремится к максимальному значению при сокращении длительности импульса накачки. При увеличении длительности импульса накачки в среде незначительно возрастает концентрация частиц на метастабильном уровне, но потери на люминесценцию и ее усиление резко возрастают. В работе [6] рекомендуются без учета люминесценции минимальные длительности импульса накачки, составляющие 0,1 – 0,2 от времени жизни частиц на метастабильном уровне. Но из приведенных графиков видно, что укорочение импульса накачки для рубина выгодно до значений 0,033 – 0,1 от времени жизни на метастабильном уровне, дальнейшее сокращение импульса накачки явно не оптимально. Для YAG:Nd можно ограничиться  $\tau_u/T_{32} = 0,1$ , так как накачка более короткими импульсами повышает  $\varphi$  не существенно. Время жизни граната на порядок меньше, чем у рубина, что создает определенные трудности в формировании столь коротких импульсов накачки. Для длинных импульсов ( $\tau_u \geq T_{32}$ ) спонтанный распад существенно опустошает метастабильный уровень, поэтому значения  $\varphi$  уменьшаются.

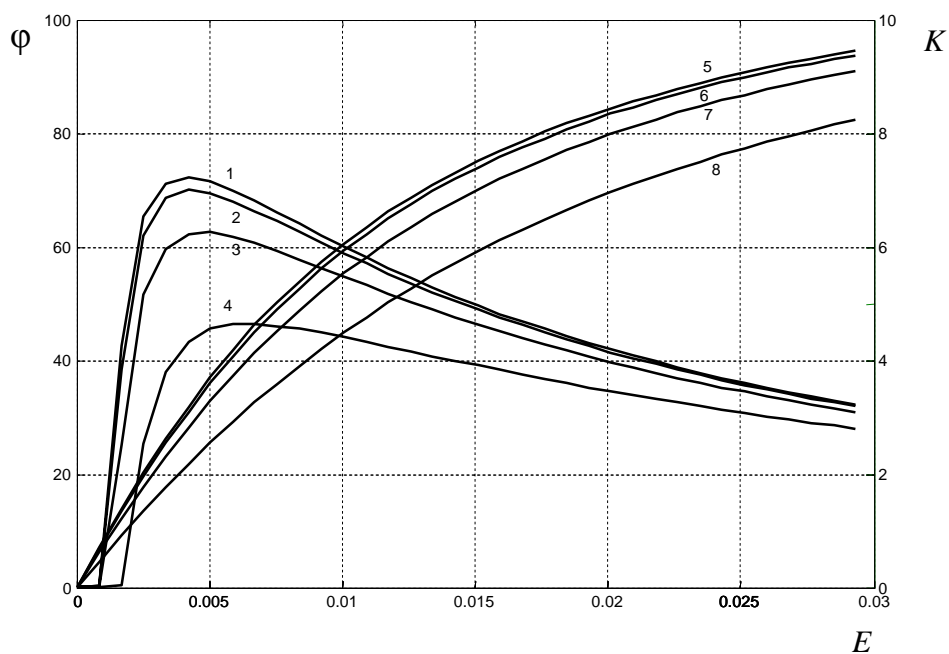
В отличие от трехуровневых сред, четырехуровневые среды имеют низкую пороговую энергию накачки, что объясняется практическим отсутствием населенности нижнего лазерного уровня, и каждый атом, оказавшийся в возбужденном состоянии, будет давать вклад в инверсию населенностей. Тогда как в трехуровневом генераторе число частиц на метастабильном уровне должно быть больше половины. Коэффициент усиления АИГ:Nd равен 18, что на много больше, чем у рубина (0,4). Поэтому усиление люминесценции в гранатовых стержнях значительно, что обуславливает низкий уровень запасаемой энергии, и выходная энергия лазеров на гранате не превышает десятых долей джоуля при любых габаритах стержней.

Таким образом, если необходима большая энергия импульса излучения при невысокой частоте следования зондирующих импульсов ЛЛС, целесообразно использовать рубин. При необходимости иметь невысокое энергопотребление при достаточно высокой частоте прохождения импульсов (десятки Гц), наилучшим элементом является

АИГ:Nd, который имеет невысокую пороговую энергию накачки и относительно высокий КПД.



а



б

Рисунок 1 - Графики зависимостей коэффициента преобразования энергии  $\phi$  (1, 2, 3, 4) и коэффициента перенаселенности  $K$  (5, 6, 7, 8) метастабильного уровня от энергии накачки для трехуровневой (а) четырехуровневой (б) активных сред при различных длительностях возбуждающего среду импульса  $\tau_u/T = 0.033$  (1, 5),  $\tau_u/T = 0.1$  (2, 6),  $\tau_u/T = 0.33$  (3, 7),  $\tau_u/T = 1$  (4, 8).

### **Выводы и перспективы развития данного направления.**

Моделирование энергетических процессов, происходящих в активном теле лазера, позволяет теоретически исследовать и обосновать наиболее приемлемые и энергетически выгодные режимы накачки лазера. Исследование этих процессов в лабораторных условиях затруднительно. Экспериментальный перебор вариантов параметров накачки требует большого количества времени и специального оборудования. Используя результаты моделирования, можно повысить энергетическую эффективность лазера без изменения конструкции системы накачки.

В статье обоснована необходимость исследования энергетической эффективности активных сред передатчиков лазерных локационных станций. Предложена теоретическая модель для четырехуровневых активных сред с использованием результатов, полученных ранее для трехуровневой среды (рубин). Приведена сравнительная оценка энергетической эффективности накачки стержней из рубина и граната. Даны рекомендации по использованию лазеров на соответствующих активных средах.

*The necessity of researching active medium's energy effectiveness in laser-locating stations transmitter was substantiated in the article. The theoretical model for four-level active medium was submitted, it based on the earlier results of three-level medium (ruby). The comparative appraisal of pumping energy effectiveness was showed for the ruby and neodymium-doped yttrium aluminate pivots. The application guidelines for the corresponding laser active mediums was done*

### **Библиографический список.**

1 Денищик Ю. С., Дрюченко А. М., Нагай И. В. Лазерная локация спутников // Вісник астрономічної школи. – К.: Видавництво національного авіаційного університету. – 2002. – Т. 3, № 2. – С. 58-69.

2 Денищик Ю. С. Об оценке влияния режима накачки на эффективность преобразования энергии в трехуровневой активной среде с учетом усиления люминесценции // Журнал прикладной спектроскопии. – 1987. – Т. 46, № 1. – С.164

3 Денищик Ю. С. Учет взаимного влияния инверсной заселенности и плотности люминесценции при оценке энергетической эффективности накачки трехуровневой активной среды в нестационарном режиме // ЖПС. – 1989. – Т. 51, № 5. – С. 777-781.

4 Денищик Ю. С., Нагай И. В. Улучшение энергетических характеристик лазеров для ЛЛС космического назначения// Вісник

*Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – Луганськ. – Видавництво СХУ ім. В. Даля. – 2006. – № 6 (100). – С. 200-206.*

*5 Методы расчета оптических квантовых генераторов/ Под ред. Б. И. Степанова. – Минск. «Наука и Техника», 1966. – Т.1. – 476 с.*

*6 Батраков А. С. – Вопросы радиоэлектроники. Сер. 12 «Общетеchnическая», 1966. – № 2. – С. 125-137*

*Рекомендовано к печати  
д. т. н., проф. Зеленовым А.Б.*