

М. И. ДЖИБЛАДЗЕ, Т. М. МУРИНА

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛАХ $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$

(Представлено академиком А. Н. Прохоровым 5 VI 1972)

Настоящая работа посвящена исследованию влияния концентрации Ду на генерационные характеристики диспрозиевого лазера — энергию излучения и порог генерации. Интерес к этим исследованиям обусловлен необходимостью определения оптимальных значений концентрации для получения максимальных мощностей излучения лазера.

Влияние спектрально-люминесцентных свойств активной среды на характеристики твердотельного лазера было исследовано в работе (1), где приведена зависимость квантового выхода и времени жизни люминесценции кристаллов $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$ от концентрации активных центров. В работе (1) отмечено, что вопрос о влиянии концентрации активных центров на параметры лазера является весьма сложным: с одной стороны, при увеличении концентрации активатора возрастает интенсивность люминесценции, приводящая к уменьшению порога генерации; с другой стороны, начиная с некоторых значений концентрации, имеет место концентрационное тушение люминесценции, следствием которого является уменьшение квантового выхода и интенсивности люминесценции, а также уширение линии люминесценции, что, в свою очередь, приводит к увеличению порога генерации.

Теоретически вопрос о влиянии концентрации активных центров на генерационные характеристики лазера наиболее полно рассмотрен в работе (2). В ней, без учета эффекта концентрационного тушения люминесценции, получены следующие выражения для пороговой мощности накачки W_0 и мощности генерируемого света E :

$$W_0 = C \frac{1 - px}{1 - x} \frac{a^0 + b^0 N}{(\tilde{a} - a^0) + (\tilde{b} - b^0) N}, \quad (1)$$

$$E = D \frac{1 - x}{1 - px} (W - W_0), \quad (2)$$

$$x = \exp \gamma [a^0 - (1 - b^0) N];$$

N — число активных центров в единице объема рабочего вещества, C и D — параметры лазера, не зависящие от концентрации активного вещества, но зависящие от потерь в резонаторе, частоты генерации лазера, числа генерируемых мод и вероятностей индуцированных и спонтанных переходов, γ — поглощение накачки в кристалле, p — коэффициент отражения осветителя.

В уравнениях (1), (2) входят величины, которые определяются потерями мод в резонаторе α и вероятностями индуцированного излучения B_e и поглощения B_a генерируемой моды. Для области значений накачки, далекой от полного насыщения, величины a^0 и b^0 определяются следующим образом (2):

$$a^0 = \alpha^0 / (B_e^0 + B_a^0), \quad b^0 = B_a^0 / (B_e^0 + B_a^0). \quad (3)$$

Величины a^0 и b^0 относятся к особым модам (модам, имеющим минимальный порог и участвующим в генерации), а величины $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ являются

усредненными значениями по всем модам. Для идеального трехуровневого лазера при отсутствии стокового смещения $\tilde{b} = b^0$, а для четырехуровневого лазера $\tilde{b} = b^0 = 0$ ($B_0 = 0$) ⁽²⁾.

Анализ уравнений (1), (2) показал, что для четырехуровневого лазера величина W_0 экспоненциально уменьшается, а E — монотонно растет с увеличением концентрации N . В случае трехуровневой среды функции (1) и (2) имеют экстремумы: с ростом N порог генерации сначала уменьшается, проходит минимум и в дальнейшем монотонно растет, а выходная энергия E с ростом N , проходя максимальное значение, монотонно уменьшается.

Различие в характере зависимости порога генерации от концентрации для трех- и четырехуровневых лазеров вызвано тем, что в трехуровневых лазерах инверсия населенности достигается в том случае, когда больше чем половина ионов переведена с основного уровня на метастабильный, а в четырехуровневых лазерах инверсия создается всеми ионами, которые попадают на метастабильный уровень. Поэтому в трехуровневых лазерах, начиная с некоторых значений концентрации, для достижения пороговой перенаселенности требуется большая мощность накачки из-за увеличения числа ионов, которые необходимо перевести на метастабильный уровень, что и приводит к возрастанию порога генерации с повышением концентрации активатора.

В четырех- и в трехуровневых лазерах уменьшение порога генерации с ростом концентрации N обусловлено увеличением коэффициента усиления активной среды. Наши эксперименты были проведены на тридцати кристаллах $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$ длиной $l = 40$ мм и диаметром $d = 6$ мм; причем серия из 6 кристаллов имела определенную концентрацию Dy в CaF_2 . Концентрация варьировалась в пределах 0,02—0,2 вес.%. Измерялись пороговые энергии накачки для различных кристаллов и энергия генерируемого импульса при постоянной накачке.

На рис. 1 пунктирной линией представлена полученная нами экспериментальная зависимость порога генерации W_0 и энергии излучения лазера E от концентрации Dy в CaF_2 (теоретическая кривая обозначена сплошной линией). Мы обнаружили соответствие с теоретическими выводами работы ⁽²⁾, а именно: зависимость порога генерации от концентрации N имеет минимум, а зависимость энергии излучения от N проходит через максимум, не совпадающий с минимумом порога генерации, что характерно для трехуровневых систем. Этого и следовало ожидать, так как лазер на $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$ при температуре жидкого азота работает по трехуровневой схеме. В отличие от наших экспериментальных результатов, в работе ⁽³⁾ для неодимового лазера, который является примером четырехуровневой системы, при изменении концентрации неодима в пределах от 2 до 6%, увеличение концентрации приводит к монотонному уменьшению пороговой энергии накачки и к увеличению энергии генерируемого импульса, что также подтверждает приведенные выше теоретические выводы работы ⁽²⁾.

Наиболее хорошее качественное совпадение теоретических кривых с экспериментальными в нашем случае было получено при следующих параметрах генератора: $\alpha^0 \simeq \alpha^0 / (2b) = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $b^0 = 0,4$; $(\tilde{a} - \alpha^0) = 0,05 \text{ см}^{-3}$; $(\tilde{b} - b^0) = 0,008$; $\gamma = 0,1 \text{ см}^3$; $p = 0,9$.

Теоретические расчеты проделаны для трехуровневой системы без учета концентрационного тушения люминесценции. Однако следует отметить, что в кристаллах $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$, начиная с концентрации 0,06 вес.% и больше, наблюдается концентрационное тушение люминесценции, которое может быть обусловлено не только взаимодействием между ионами Dy^{2+} , но и,

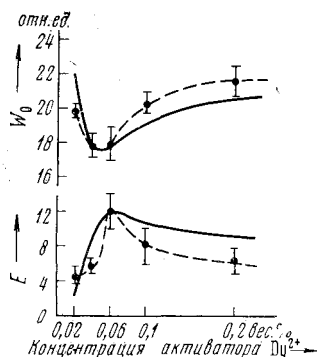


Рис. 1

главным образом, влиянием избыточных ионов Dy^{3+} , а именно, передачей энергии от Dy^{2+} к Dy^{3+} нерезонансным путем ⁽⁴⁾, что, по-видимому, и является причиной расхождения теоретических и экспериментальных кривых при больших значениях N .

Из приведенных экспериментальных и теоретических кривых видно, что концентрация активных центров, соответствующая максимальной выходной энергии $N_{E_{\max}}$, больше, чем концентрация, соответствующая минимальному порогу генерации $N_{W_{\min}}$. Эксперименты, проведенные нами, показали, что разность между $N_{E_{\max}}$ и $N_{W_{\min}}$ растет с увеличением энергии накачки. Для идеальной трехуровневой системы и при невысоких коэффициентах поглощения света накачки активным веществом из уравнений, полученных в работе ⁽²⁾, можно вывести зависимость $\Delta N = N_{E_{\max}} - N_{W_{\min}}$ от величины превышения мощности накачки над пороговой мощностью W / W_0 :

$$\Delta N = \sqrt{\frac{1-p}{\gamma b^0(1-b^0)}} \left[\sqrt{\frac{1-px}{1-x} \left(a^0 + b^0 N_{W_{\min}} \frac{W}{W_0} \right)} - \sqrt{\frac{2a^0}{(1-p)(1-b^0)}} \right]; (5)$$

здесь W_0 — пороговое значение мощности накачки лазера при концентрации $N_{W_{\min}}$.

Уравнение (5) показывает, что разность между величинами концентрации, соответствующей максимальной генерации и минимальному порогу, растет с увеличением W / W_0 , что согласуется с нашими экспериментальными результатами. Величины смещения концентрации ΔN , оцененные по формуле (5), намного меньше, чем экспериментально полученные значения, что, по-видимому, связано с концентрационным тушением люминесценции и с отклонением от идеальной трехуровневой системы ($b \neq b^0$; $B_a \neq B_c$) для лазера на кристаллах $CaF_2 : Dy^{2+}$.

В заключение отметим, что в трехуровневых активных средах концентрация активатора, соответствующая максимальной энергии излучения, больше, чем концентрация, соответствующая минимальному порогу генерации, и это необходимо учитывать при выборе концентрации активатора кристаллов.

Институт кибернетики
Академии наук ГрузССР
Тбилиси

Поступило
6 III 1972

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР
Москва

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. М. Галактионова, В. Ф. Егорова и др., Оптика и спектроскопия, 23, № 6, 949 (1967). ² В. С. Машкевич, Основы кинетики излучения лазеров, Киев, 1966. ³ Н. М. Галактионова, В. Ф. Егорова и др., ДАН, 173, № 6, 1284 (1967). ⁴ С. Х. Батыгов, Р. Г. Микаелян и др., Неорганические материалы, 3, № 5, 760 (1967).