

**M. R. Bedilov, U. Egamov. An Effect of Radiation Defects on Emission Characteristics of Solid-State Lasers.**

Temporal, energy and spectral characteristics are studied of YAG: Nd<sup>3+</sup> and glass lasers exposed to the gamma-radiation from <sup>60</sup>Co in the dose range from 0 to 10<sup>9</sup> R. It has been established experimentally that radiation defects induced by the ionizing radiation change considerably emission characteristics of solid-state lasers.

«Квантовая электроника», 8, № 7 (1981)

УДК 621.373.826

Ф. В. Бункин, В. И. Держив, С. И. Яковленко

**ТРЕБОВАНИЯ К НАКАЧКЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА ИОНИЗИРУЮЩИМ ИСТОЧНИКОМ**

Показано, что при накачке среды с атомным номером  $Z \approx 30$  коротковолновым электромагнитным излучением с длиной волны  $\lambda_n \leq 0,1$  нм и интенсивностью  $\sim (10^{15} - 10^{16})$  Вт/см<sup>2</sup> в течение времени  $t_n \geq 30$  нс в принципе возможно достижение лазерного эффекта на переходах  $n_i = 5,4 \rightarrow n_f = 3$  между водородоподобными состояниями многократных ионов ( $\lambda_{ген} \sim 1 - 2$  нм). Активная среда может сформироваться в процессе облучения, например, медной или латунной проволоки длиной  $l \sim 1$  м и начальным радиусом  $r_0 \leq 0,3$  мм.

Как известно (см. [1], § 16) рекомбинационную неравновесность плазмы можно стационарно поддерживать внешним ионизирующим источником (например, электронным пучком или коротковолновым электромагнитным излучением), причем непосредственно во время воздействия ионизирующего источника в среде могут реализоваться условия для лазерного эффекта. Такая ситуация сравнительно подробно рассмотрена для плазменных лазеров видимого диапазона, однако для коротковолнового диапазона ( $\lambda_{ген} < 50$  нм) обсуждалась только накачка, при которой ввод энергии и охлаждение электронов существенно разделены во времени. Это объясняется отсутствием лабораторных источников ионизирующего излучения с плотностью потока, достаточной для накачки переходов в коротковолновом диапазоне. В этой работе, рассмотрев «экзотические» источники [2], мы оценим требования к потоку ионизирующего рентгеновского излучения, необходимому для достижения генерации в области 1–2 нм.

Будем ориентироваться на известную схему [3, 1] инверсии населенностей водородоподобных уровней  $n = 5, 4, 3$ . Инверсия на переходах  $n_i = 5,4 \rightarrow n_f = 3$  возникает в результате того, что нижние уровни  $n_f$  радиационно распадаются быстрее верхних  $n_i$ . На инверсию относительно уровня  $n_f = 2$  рассчитывать не будем ввиду реабсорбции излучения переходов  $2 \rightarrow 1$  и накачки  $1 \rightarrow 2$  быстрыми вторичными электронами (см. [1], § 16). Переходы  $n_i = 5,4 \rightarrow n_f = 3$  имеют  $\lambda_{ген} \sim 1 - 2$  нм при заряде ядра  $Z \approx 30$ . Например, для  $Z = 26$  (железо)  $\lambda_{43} = 2,77$  нм,  $\lambda_{53} = 1,9$  нм; для  $Z = 29$  (медь)  $\lambda_{43} = 2,23$  нм,  $\lambda_{53} = 1,52$  нм; для  $Z = 30$  (цинк)  $\lambda_{43} = 2,08$  нм,  $\lambda_{53} = 1,42$  нм. Потенциалы ионизации  $J_Z = 13,6 Z^2$  эВ для H-подобных ионов этих элементов составляют  $J_{Fe} = 9,2$  кэВ,  $J_{Cu} = 11,4$  кэВ,  $J_{Zn} = 12,2$  кэВ. Для стационарной накачки необходимо, чтобы энергия кванта накачки  $\hbar\omega_n$  была больше  $J_Z$ . Это соответствует длине волны накачки  $\lambda_n \sim 0,1$  нм и эффективной температуре источника  $T_{ист} \gtrsim 10$  кэВ.

Для того чтобы реализовалась инверсия на переходах  $n_i = 5,4 \rightarrow n_f = 3$ , концентрация и температура электронов плазмы должны быть сравнительно невелики (см. рис. 5, 3 в [1]):  $N_e \sim (5 - 10) \cdot 10^{11} Z^7$  см<sup>-3</sup>  $\sim 10^{22}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e \sim (1 - 2) Z^2$  эВ  $\sim 1 - 2$  кэВ. Если в начальном состоянии среда была твердым телом, например латунной проволокой с радиусом  $r_0 = 0,3$  мм, то разлет концентрации электронов от  $N_{e0} \sim Z \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>  $\approx 3 \cdot 10^{23}$  см<sup>-3</sup> до  $N_e \sim 10^{22}$  см<sup>-3</sup> со скоростью  $v_T \sim \sqrt{2T_e/m_p} \sim \sqrt{T_e/m_p Z} \sim 0,5 \cdot 10^7$  см/с ( $A \approx 2Z$ ,  $m_p = 1,6 \cdot 10^{-24}$  г) происходит за время  $t_{раз} = r_0/v_T (N_{e0}/N_e)^{1/2} \sim 30$  нс.

Время действия жесткого источника накачки  $t_n$  должно превосходить время разлета до требуемой концентрации электронов:  $t_n > t_{раз}$ . Отметим, что при накачке, обусловленной тепловой ионизацией и последующим охлаждением [1], время накачки ограничено не снизу, а сверху ( $t_n < t_{раз}$ ).

Пороговая интенсивность ионизирующего излучения  $I_n$  при условии равенства числа ионизации и рекомбинации связана с пороговым коэффициентом усиления  $\kappa_n$  актов ионизации и рекомбинации связана с пороговым коэффициентом усиления  $\kappa_n$  следующей формулой:

$$\kappa_n \approx (\lambda_{ген}^2 / 16 \Delta\omega) (N_{Z-1} \sigma_{фн} I_n / \hbar\omega_n),$$

где  $\Delta\omega$  — эффективная ширина линии;  $\sigma_{фн}$  — сечение фотоионизации иона  $Z-1$ ;  $N_{Z-1} \sim N_Z \sim N_e / Z \sim 3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-1</sup>.

Исходя из длины проволоки  $l \sim 1$  м, положим  $\kappa_n \sim 10/l \sim 0,1$  см<sup>-1</sup>. Взяв с некоторым превышением штарковскую ширину линии в виде

$$\Delta\omega = 11 \frac{\hbar}{m_e} (n_f^2 - n_i^2) \left( \frac{N_e}{Z} \right)^{2/3} \sim \begin{cases} 5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} & \text{для } 4 \rightarrow 3, \\ 10^{16} \text{ с}^{-1} & \text{для } 5 \rightarrow 3, \end{cases}$$

получаем условия

$$\sigma_{\text{фи}} \frac{I_n}{\hbar\omega_n} > \begin{cases} 5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} & \text{для } 4 \rightarrow 3 (Z=30), \\ 3 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} & \text{для } 5 \rightarrow 3 (Z=30). \end{cases}$$

При  $\sigma_{\text{фи}} \sim 10^{-21}$  см<sup>2</sup>,  $\hbar\omega_n \sim 10$  кэВ  $\approx 1,6 \cdot 10^{-15}$  Дж имеем условие  $I_n \sim 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> для перехода  $4 \rightarrow 3$  и  $I_n \sim 5 \cdot 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> для  $5 \rightarrow 3$  ( $Z=30$ ). Такая интенсивность при расстоянии  $\sim 1$  м до источника накачки соответствует выделению  $10^{14}$  Дж за 50 нс, если в жестком излучении содержится более 10% энергии. Расходимость лазерной генерации при этом должна составлять  $\varphi = v_T t_{\text{раз}}/l \sim 10^{-3}$  рад.

Изложенные оценки показывают, что лазерный эффект на длине волны  $\lambda_{\text{ген}} \approx 1,4$  нм, о котором упомянуто в сообщении [2], может иметь место (наиболее близко к указанной длине волны переход  $5 \rightarrow 3$  в цинке, см. выше). Однако содержащейся в сообщении [2] информации совершенно недостаточно как для того, чтобы судить о надежности самого эксперимента, так и для того, чтобы пытаться интерпретировать его более конкретно. Впрочем рассмотрение динамики вынужденного разлета плазмы под воздействием мощного электромагнитного излучения, аналогичное проведенному в работах [4, 5], в связи с вышеизложенным приобретает дополнительный интерес.

1. Л. И. Гудзенко, С. И. Яковленко. Плазменные лазеры. — М.: Атомиздат, 1978.
2. C. Robinson, Jr. *Aviation Week Space Techn.*, **114**, No.8, 25 (1981).
3. Б. Ф. Гордиец, Л. И. Гудзенко, Л. А. Шелепин. *Журн. прикл. мех. и техн. физ.*, **5**, 115 (1966).
4. В. И. Держиев, В. С. Марченко, С. И. Яковленко. *Письма в ЖТФ*, **6**, 605 (1980).
5. А. Г. Жидков, В. С. Марченко. Препринт ИАЭ-3389. М., 1981.

Физический институт  
им. П. Н. Лебедева АН СССР, Москва

Поступило в редакцию  
28 мая 1981 г.

F. V. Bunkin, V. I. Derzhiev, S. I. Yakovlenko. **Requirements on X-Ray Laser Pumping by a Ionization Source.**

The laser effect due to  $n_1=5,4 \rightarrow n_f \approx 3$  transitions between hydrogen-like states of multicharged ions ( $\lambda_l=1-2$  nm) is shown to be possible in principle upon pumping of the medium with atomic number  $z \approx 30$  by the short-wavelength electromagnetic radiation at the wavelength of  $\lambda_p \leq 0.1$  nm with the intensity of  $I_p \leq (10^{15}-10^{16})$  W/cm<sup>2</sup> during  $t_p \geq 30$  ns. The active medium can be formed, for example, in the course of exposure of a copper or brass wire with the length of  $l \sim 1$  m and initial radius of  $r_0 \leq 0.3$  mm.