

01;05;07;09;12

Условие генерации излучения в разерах

© Ю.М. Сеидов, Э.М. Шахвердиев, И.И. Аббасов

Институт физики АН Азербайджана,
370143 Баку, Азербайджан

(Поступило в Редакцию 24 января 1997 г.)

Система кинетических уравнений, описывающая динамику спина с учетом резонатора для описания действия ядерного магнитного резонанса — мазера, или разера, выглядит следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\mu}_y &= -\Gamma_2 \mu_y - G \mu_y \mu_z, \\ \dot{\mu}_z &= -\Gamma_1 (\mu_z - \mu_e) + G \mu_y^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь μ_y, μ_z — компоненты спина (считалось, что $\mu_x \equiv 0$); μ_e — ядерная намагниченность, обусловленная поляризацией ядерных спинов; $\Gamma_{1,2} = T_{1,2}^{-1}$ ($T_{1,2}$ — времена продольной и поперечной ядерной релаксации); $G = 2\pi\gamma\xi Q$ (γ — гиромагнитное отношение для ядер, Q — добротность резонатора, ξ — коэффициент заполнения катушки (см. ниже)). Согласно [1], в эксперименте высококачественный монокристалл рубина $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ помещался в резонатор. Наблюдения проводились при $T = 1.6\text{ К}$ в постоянном поле $H_0 = 1.1 \cdot 10^4\text{ Ое}$ (частота ядерного магнитного резонанса в ^{27}Al $\omega_0/2\pi = 12\text{ МГц}$). На образец была намотана катушка, являющаяся частью колебательного LC -контура с частотой $\omega_{LC} = (LC)^{-1/2} \approx \omega_0$. Микроволновый генератор настраивался на частоту ω' , близкую к частоте электронно-парамагнитного резонанса $\omega_e \approx 30\text{ ГГц}$. При $\omega' < \omega_e$ динамическая ядерная поляризация имеет отрицательный знак ($\omega_e < 0$), т.е. реализуется разер [1].

В [1] условие генерации излучения получено путем исследования стационарного решения системы (1). Установлено, что условие

$$G|\mu_e| > \Gamma_2 \quad (2)$$

соответствует режиму генерации.

В настоящей работе впервые условие (2) в одном предельном случае получено методом асимптотического разложения решений сингулярно-возмущенных нелинейных систем по малому параметру. Ранее этот метод применялся нами в [2–6].

Для удобства дальнейшего перейдем к безразмерным величинам

$$\begin{aligned} \mu'_y &= \mu_y \mu_0^{-1}, \quad \mu'_z = \mu_z \mu_0^{-1}, \quad t' = t\tau^{-1}, \\ \tau &= \Gamma_2^{-1}, \quad \mu_0 = (G\tau)^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

после чего получаем следующую систему кинетических уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\mu}'_y &= -\mu'_y - \mu'_y \mu'_z, \\ \Gamma_2 \Gamma_1^{-1} \dot{\mu}'_z &= \mu_e \mu_0^{-1} - \mu'_z + \Gamma_2 \Gamma_1^{-1} (\mu'_y)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Примем, что начальные условия ненулевые (наиболее общий случай)

$$\mu'_y(0) \equiv \mu'_y(t=0), \quad \mu'_z(0) \equiv \mu'_z(t=0).$$

Считая $\Gamma_2 \Gamma_1^{-1}$ малым параметром задачи, после применения вышеназванного асимптотического метода для сингулярных систем нелинейных уравнений в нулевом приближении получаем

$$\begin{aligned} \mu'_y(t') &= \mu'_y(0) \exp(-(1 + \mu_e \mu_0^{-1})t'), \\ \mu'_z(t') &= \mu'_z(0) \exp(-\Gamma_1 \Gamma_2^{-1} t') \\ &\quad + \mu_e \mu_0^{-1} (1 - \exp(-\Gamma_1 \Gamma_2^{-1} t')) \end{aligned} \quad (5)$$

(поскольку $\Gamma_2 \Gamma_1^{-1} = T_1 T_2^{-1}$ и обычно $T_2 \ll T_1$, то выполнение условия $\Gamma_2 \Gamma_1^{-1} < 1$ представляется несколько проблематичным. Однако, как показывают оценки, приведенные в [1,7], в ряде случаев для некоторых магнитных систем [1] малость $\Gamma_2 \Gamma_1^{-1} < 1$ вполне реализуема). Из (5) сразу видно, что если

$$|\mu_e| \mu_0^{-1} \gg 1, \quad (6)$$

то в системе развивается неустойчивость (напомним, что $\mu_e < 0$). В соответствии с [8] такая неустойчивость соответствует генерации лазерного (в нашем случае разерного) излучения. Легко заметить, что условие (6) полностью эквивалентно соотношению (2).

Список литературы

- [1] Алексеев К.Н., Берман Г.П., Цифринович В.И., Фришман А.М. // УФН. 1992. Т. 162. № 7. С. 81–118.
- [2] Шахвердиев Э.М. // ФТТ. 1992. Т. 34. Вып. 2. С. 603–610.
- [3] Шахвердиев Э.М. // ФТТ. 1993. Т. 35. Вып. 3. С. 833–843.
- [4] Шахвердиев Э.М. // Изв. вузов. Физика. 1994. Т. 36. № 12. С. 24–26.
- [5] Шахвердиев Э.М. // ФТТ. 1994. Т. 36. Вып. 1. С. 25–35.
- [6] Шахвердиев Э.М., Садыхов Э.А. // ФТП. 1994. Т. 28. Вып. 3. С. 257–261.
- [7] Аллен П., Эберли Дж. // Оптический резонанс и двухуровневые системы. М., 1978. 222 с.
- [8] Хакен Г. // Лазерная светодинамика. М., 1988. 350 с.