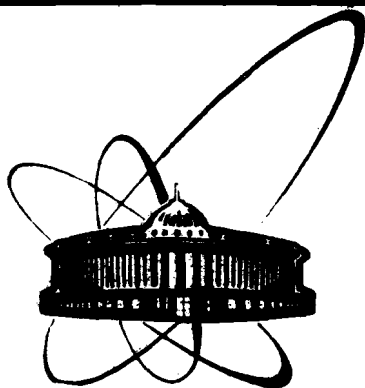


89-748



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

К 44

P17-89-748

Ю.Ф.Киселев, Э.И.Алискендеров

**РАДИОЧАСТОТНОЕ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ
В РЕЗОНАТОРЕ**

Направлено в журнал "Письма в ЖЭТФ"

1989

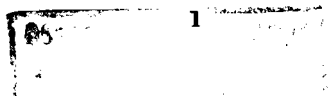
В работе^{1/} сообщалось об обнаружении явления радиочастотного сверхизлучения (СИ), что было подтверждено независимыми исследованиями^{2/}. В опытах^{1/} ларморовская частота ω_0 инверсно поляризованной по отношению к внешнему подмагничивающему полю H_0 протонной спиновой системы совмещалась с резонансной частотой пассивного радиочастотного контура путем изменения H_0 , после чего в зависимости от величины начальной поляризации наблюдался либо длинный импульс мазерной генерации (МГ), либо СИ и МГ-импульсы, разделенные временным интервалом. Более детальный анализ данных^{1/} показывает, что с ростом модуля начальной поляризации длительность МГ-импульса возрастает (рис. 1а,б), а длительность СИ-импульса уменьшается^{1/}. Как следует из расчетов Блума^{3/}, уравнения Блоха не дают даже качественного объяснения расширению длительности МГ-импульса с ростом модуля начальной поляризации. Характерной особенностью опытов^{1/} является примерное равенство ширины линии ЯМР и полосы пропускания контура (около 40 кГц). Причина расхождения с экспериментом в том, что уравнения Блоха не учитывают комплексного характера импеданса радиочастотного контура, когда частота излучения не совпадает с частотой настройки контура. Пользуясь обозначениями работы^{3/}, получим модифицированные уравнения Блоха с учетом фазово-частотной характеристики контура, которые, по крайней мере, качественно, объясняют наблюдаемый эффект. Если H_0 направлено по оси z , а θ - угол между z и вектором намагниченности \vec{M} , то его компоненты равны $M_x = M \sin\theta \cos\phi$; $M_y = -M \sin\theta \sin\phi$; $M_z = M \cos\theta$, где ϕ - угол между компонентой намагниченности в x - y плоскости и осью x . Компоненты магнитного поля с учетом фазового сдвига φ между напряжением и током в контуре имеют вид

$$\begin{aligned} H_x &= H_1 \cos\omega t + H_r \sin(\phi - \varphi), & H_y &= -H_1 \sin\omega t + H_r \cos(\phi - \varphi), \\ H_z &= H_0, & \varphi &= \arctg[(\omega_1 L - 1/\omega_1 C)/R], \end{aligned} \quad (1)$$

где ω_1 - частота тока в контуре; L, C, R - индуктивность, емкость и активное сопротивление контура соответственно. Предполагается, что внешнее радиочастотное поле $2H_1 \cos\omega t$ направлено вдоль оси x , H_r - компонента поля, создаваемая вращающейся намагниченностью $M \sin\theta$. Так как H_r пропорциональна модулю тока в контуре, то можно записать

$$H_r = k M \cos\phi \sin\theta, \quad (2)$$

где константа k должна определяться на резонансной частоте контура при $\varphi=0$. Вводя новые переменные^{3/} $u = M_x \cos\omega t - M_y \sin\omega t = M \sin\theta \cos(\omega t - \phi)$, $v = -M \sin\omega t - M \cos\omega t = -M \sin\theta \sin(\omega t - \phi)$, и используя уравнения (1,2), по-



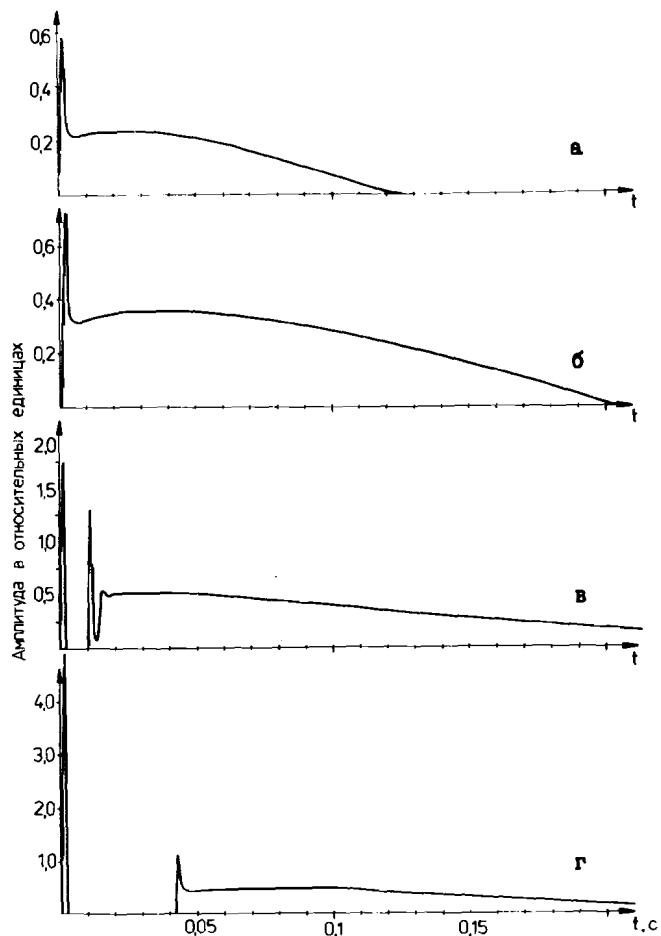


Рис. 1. Амплитуда МГ и СИ-импульсов в зависимости от начальной поляризации протонов $C_3H_8O_2$ - пропандиола; $P = -0,18, -0,34, -0,49, -0,50$ соответственно для рис. 1а, б, в, г. Длительность МГ-импульсов на рис. 1а, б в соответствии с (4) пропорциональна поляризации. Скорость изменения $H_0 = 100$ Гс/с.

лучаем модифицированную систему уравнений Блоха при комплексном импедансе радиочастотного контура

$$\frac{du}{dt} + \beta u + \delta v = -rM_z [u \cos\varphi + v \sin\varphi],$$

$$\frac{dv}{dt} + \beta v - \delta u + M_z = -rM_z [v \cos\varphi - u \sin\varphi], \quad (3)$$

$$\frac{dM_z}{dt} + \alpha M_z - v = \alpha M_0 + r [u^2 + v^2] \cos\varphi,$$

где $\tau = \gamma H_1 t$; $\alpha = 1/\gamma H_1 T_1$; $\beta = 1/\gamma H_1 T_2$; $\delta = (\omega_0 - \omega)/\gamma H_1$;

$$\omega_0 = \gamma H_0; \quad r = k \cos\varphi / H_1.$$

При $\varphi = 0$ система уравнений (5) тождественна уравнениям /3/, откуда $k = 2\pi\eta Q$, где η -фактор заполнения, Q -добротность контура. Члены с r в уравнениях (3) через угол φ теперь зависят от фазово-частотной характеристики контура, что приводит к качественно новым эффектам. Из уравнений (3) следует, что частота генерации спиновой системы, сильно связанной с пассивным резонансным контуром при $\varphi \neq 0$, не равна ларморовской частоте ω_0 . При $H_1 = 0$ имеем

$$\omega_1 = \frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + \gamma k M_z \sin\varphi \cos\varphi, \quad (4)$$

и, следовательно, момент возбуждения генерации, а также длительность излучения зависят от M_z (рис. 1а, б). В нашем случае сдвиг частоты $\omega_0/2\pi = 2.1 \cdot 10^7$ Гц достигает 10^5 Гц. Напомним, что $H_0(t)$ в процессе опыта изменяется с постоянной скоростью. Модуляция H_0 приводит к девиации φ и появлению амплитудной модуляции, которая наблюдалась в работе /1/. При дальнейшем возрастании начальной поляризации происходит частичный реверс намагниченности M_z (рис. 1в), вследствие чего генерация временно прекращается. Затем нереверсированная часть линии ЯМР вновь возбуждает МГ (длинные импульсы на рис. 1в, г). Особо отметим, что во всех обсуждаемых опытах в результате действия механизма спиновой диффузии конечная поляризация ядер уменьшается по модулю, но остается отрицательной величиной. Таким образом, изменение знака намагниченности вовсе не является достаточным условием /2/ для идентификации СИ. Из уравнений (3) также следует видоизмененное условие возникновения МГ, которое является необходимым /4/ условием и для возникновения СИ

$$T_2^{-1} = 2\pi\eta\gamma Q |M_z| \cos^2\varphi, \quad M_z < 0. \quad (5)$$

Это уравнение означает, что возникновение излучения вне полосы пропускания контура невозможно, поэтому момент возникновения излучения из уравнений (3) будет существенно отличаться от расчета по классическим уравнениям Блоха даже в случае узких линий ЯМР, характерных для поляризованных жидкостей.

Таким образом, в нелинейных процессах СИ и МГ реальный пассивный резонатор сдвигает частоту генерации по отношению к ларморовской частоте спинов и оказывает влияние на условие самовозбуждения МГ и СИ. Модифицированные уравнения (3) могут найти важные практические приложения в связи с возможностью получения высокой поляризации при комнатных температурах методом химической поляризации ядер^{15/}.

В заключение выражаем глубокую признательность Н.Бломбергену за интерес, проявленный к работе^{1/} по обнаружению радиочастотного СИ, Н.Н.Боголюбову - за поддержку работы, А.С.Шумовскому - за полезные обсуждения, А.Ф.Прудкогляду - за разрешение использовать результаты совместного эксперимента.

Литература

1. Киселев Ю.Ф., Прудкогляд А.Ф., Шумовский А.С., Юкалов В.И. ЖЭТФ, 1988, т.94, с.344. Mod.Phys.Let.V. 1988. V.1. P.409.
2. Бажанов Н.А., Буляница Д.С., Ковалев А.И., Поляков В.В. и др. ФТТ, 1989, т.31, в.2, с.206.
3. Bloom S. J.Appl.Phys. 1957. V.28. P.800.
4. Киселев Ю.Ф., Шумовский А.С., Юкалов В.И. Препринт ОИЯИ. 1989. P17-89-441.
5. Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. 1978, Наука, гл.2.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 ноября 1989 года.

Киселев Ю.Ф., Алискендеров Э.И. P17-89-748
Радиочастотное сверхизлучение в резонаторе

Получены модифицированные уравнения Блоха с учетом фазово-частотной характеристики колебательного контура. Показано, что нелинейные процессы радиочастотного сверхизлучения (СИ) и мазерной генерации (МГ), а также частота генерации тесно связаны с фазовой характеристикой контура. При МГ наблюдается явление удержания частоты генерации в полосе пропускания контура и возрастание длительности излучения с ростом начальной поляризации. При СИ, вследствие реверса намагниченности, длительность излучения резко сокращается. Дается качественное объяснение экспериментальным данным.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод М.И.Потапова.

Kiselev Yu.F., Aliskenderov E.I. P17-89-748
Radio-Frequency Superradiation in the Cavity

Modified Bloch equations have been obtained with allowance for the phase-frequency characteristic of the oscillating circuit. The non-linear processes of the radio-frequency superradiation (SR) and maser generation (MG) as well as the generation frequency are shown to be closely related to the phase characteristic of the circuit. During MG a phenomenon of the generation frequency kept in the resonator bandpass and an increase in the radiation duration with increasing initial polarisation are observed. During SR the radiation duration sharply decreases because of magnetisation reverse. The experimental data are qualitatively explained.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989