

УДК 621.378.527

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНВЕРСИИ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА В КВАНТОВЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Я. Л. Шамфаров, Н. Т. Черняк

Предложены и изучены два метода определения стационарного значения коэффициента инверсии активного вещества квантового парамагнитного усилителя по картинам переходных процессов, имеющих место при включении и выключении мощности накачки

Коэффициент инверсии является важным параметром квантового парамагнитного усилителя (КПУ), подлежащим экспериментальному определению. Известный стационарный метод, при котором коэффициент инверсии определяется из сравнения интенсивностей линии ЭПР поглощения и инвертированной линии ЭПР излучения, применим к малым образцам, магнитная добротность которых значительно выше добротности резонатора, когда регенерацией можно пренебречь. Однако магнитная добротность образца активного материала КПУ низка и сравнима с добротностью резонатора. Роль регенерации при этом весьма существенна. Поэтому измерение коэффициента инверсии в действующем КПУ вызывает определенные трудности. Ниже будет показано, что наблюдение переходных процессов при выключении и включении мощности накачки позволяет определить коэффициент инверсии в действующем КПУ двумя методами.

1. *Нестационарный метод определения коэффициента инверсии КПУ из картины переходного процесса при выключении накачки.* Рассмотрим трехуровневый КПУ. Пусть вспомогательным переходом является переход $1 \leftrightarrow 3$, а переход $3 \leftrightarrow 2$ — рабочий. Если после выключения накачки процесс релаксации разности населенностей уровней рабочего перехода Δn_{32} описывается одной экспонентой, то можно написать

$$\Delta n_{32}(t) = (\Delta n_{32}^{\text{стан}} - \Delta N_{32}) \exp(-t/T_1) + \Delta N_{32}.$$

Здесь $\Delta n_{32}^{\text{стан}}$ — стационарное, а ΔN_{32} — равновесное значение разности населенностей уровней. Отсюда для коэффициента инверсии $I = \Delta n_{32} / \Delta N_{32}$ получаем

$$I(t) = (I_{\text{стан}} + 1) \exp(-t/T_1) - 1. \quad (1)$$

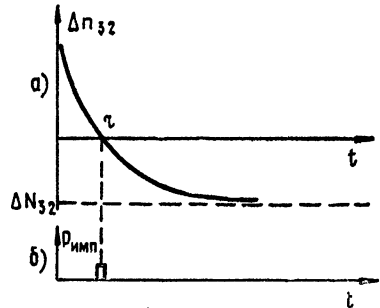
В некоторый момент времени $t = \tau$ $I(\tau) = 0$ (рис. 1). Из этого условия и из (1) находим

$$I_{\text{стан}} = \exp(\tau/T_1) - 1. \quad (2)$$

Следовательно, для определения $I_{\text{стан}}$ необходимо измерить время спин-решеточной релаксации T_1 и время выравнивания населенностей уровней рабочего перехода после выключения накачки τ . T_1 может

быть измерено на малом образце активного материала, так как оно не зависит от распределения высокочастотного магнитного поля. Следует заметить, что T_1 должно быть определено не методом импульсного насыщения уровней рабочего перехода, а из экспериментов по наблюдению процесса кривой релаксации спин-системы после выключения накачки. Измеренное таким образом значение может отличаться от значения, измеренного обычным методом импульсного насыщения.

Рис. 1. а) Зависимость разности населенностей Δn_{32} от времени при выключении накачки.
б) Зондирующий импульс.



2. *Нестационарный метод определения коэффициента инверсии из картины переходного процесса при включении накачки.* Картина переходного процесса установления коэффициента усиления КПУ после включения накачки также содержит информацию о коэффициенте инверсии $I_{\text{стац}}$. Для трехуровневого КПУ, например, коэффициент инверсии определяется выражением

$$I_{\text{стац}} = \frac{\frac{\nu_n}{\nu_c} - \left(1 + \frac{\omega_{32}}{\omega_{21}}\right)}{1 + \frac{\omega_{32}}{\omega_{21}}} \quad (3)$$

Отсюда видно, что $I_{\text{стац}}$ определяется соотношением частот накачки и сигнала ν_n/ν_c и отношением вероятностей релаксационных переходов ω_{32}/ω_{21} , где ω_{ij} — вероятность релаксационного перехода с i -го уровня на j -й. При включении накачки сравнительно большой мощности, при которой вероятность индуцированных переходов W_{13} значительно больше вероятности релаксационных переходов ω_{13} , т. е. $W_{13}/\omega_{13} \gg 1$, вспомогательные уровни быстро выравниваются. Достижимое при этом начальное значение коэффициента инверсии определяется соотношением частот ν_n/ν_c :

$$I_0 = \frac{N_3 + N_1 - N_2}{N_2 - N_3} = \frac{1}{2} \left(\frac{\nu_n}{\nu_c} - 1 \right),$$

N_i — населенность i -го уровня в термодинамическом равновесии. Стационарное значение $I_{\text{стац}}$, которое зависит также и от отношения ω_{32}/ω_{21} , устанавливается после включения накачки медленно, с характерным временем T_1 .

Решение системы кинетических уравнений без учета возможных кросс-релаксационных переходов приводит к следующему уравнению для процесса установления значения коэффициента инверсии после включения накачки большой мощности (при которой вспомогательный переход мгновенно насыщается):

$$I(t) = (I_0 - I_{\text{стац}}) \exp(-t/T_1) + I_{\text{стац}} \quad (4)$$

Как видно из (3), при $\omega_{32}/\omega_{21} = 1$ $I_0 = I_{\text{стац}}$ и переходный про-

цесс отсутствует. Это объясняется тем, что при $\omega_3/\omega_{21} = 1$ населенность второго уровня сохраняет равновесное значение. При $\omega_3/\omega_{21} < 1$ $I_{\text{стац}} > I_0$, при $\omega_3/\omega_{21} > 1$ $I_{\text{стац}} < I_0$. Из картины переходного процесса установления $I_{\text{стац}}$ можно определить отношение $I_{\text{стац}}/I_0$. Поскольку I_0 известно из соотношения частот ν_n/ν_c , то известным оказывается и $I_{\text{стац}}$.

В действительности экспериментально наблюдается переходный процесс установления коэффициента усиления КПУ — K , а не коэффициента инверсии. Для связи между коэффициентом инверсии и коэффициентом усиления можно получить следующие соотношения. Для резонаторного КПУ

$$\frac{I_{\text{стац}}}{I_0} = \frac{(K_{\text{стац}} - 1)(K_0 + 1)}{(K_{\text{стац}} + 1)(K_0 - 1)}, \quad (5)$$

для КПУ БВ

$$\frac{I_{\text{стац}}}{I_0} = \frac{\lg K_{\text{стац}}}{\lg K_0}. \quad (6)$$

Соображения, изложенные на примере трехуровневого КПУ, остаются справедливыми и для других схем накачки. Для четырехуровневого КПУ с пушпульной схемой накачки начальное и стационарное значения коэффициента инверсии определяются выражениями [1]

$$I_0 = \frac{N_1 + N_3 - (N_2 + N_4)}{2(N_2 - N_3)} = \frac{\nu_n}{\nu_c} - 1 \quad (\nu_n = \nu_{13} = \nu_{24}, \quad \nu_c = \nu_{32}),$$

$$I_{\text{стац}} = \frac{\omega_{41}\nu_{41} + \omega_{43}\nu_{43} + \omega_{21}\nu_{21} - \omega_{32}\nu_{32}}{\omega_{41} + \omega_{43} + \omega_{21} + \omega_{32}}.$$

Если все вероятности релаксационных переходов одинаковы, то $I_{\text{стац}} = I_0$. В общем случае $I_{\text{стац}} \neq I_0$.

3. Оба метода определения коэффициента инверсии были проверены экспериментально на двухрезонаторном рубиновом КПУ с пушпульной схемой накачки. Исследуемый КПУ характеризуется следующими параметрами. Частота накачки $\nu_n = 23,2$ Гц, частота сигнала $\nu_c = 9,2$ Гц, концентрация хрома — 0,05%, рабочая температура — 4,2°К, время спин-решеточной релаксации $T_1 = 28$ мсек. Произведение коэффициента усиления по напряжению на полосу $K\Delta f = 200$ Мгц. Активный резонатор полностью заполнен рубином. Выключение и включение мощности накачки достигалось путем модуляции прямоугольными импульсами напряжения отражательного клистрона, который является источником накачки. Длительность импульсов регулировалась в пределах 0—300 мсек.

Исследуемый КПУ использовался как входной усилитель супергертеродинного приемника 3-сантиметрового диапазона. На выходе приемника включен осциллограф. Для наблюдения переходного процесса на вход КПУ подавался слабый импульсно модулированный сигнал. Длительность импульсов была равна 10 мсек, частота следования 10 кГц.

Согласно первому методу, необходимо измерить время выравнивания населенностей уровней сигнального перехода после выключения накачки τ . Определение момента равенства населенностей осуществлялось следующим образом. На вход КПУ, кроме слабого контрольного сигнала, с регулируемой задержкой относительно момента выключения накачки перед ее включением подавались зондирующие импульсы мощностью 0,5 Вт и длительностью 30 мсек. По окончании этих им-

пульсов накачка включалась снова. Если в момент подачи импульса $\Delta n_{32} > 0$, то импульс насыщает систему, выравнивая населенности уровней сигнального перехода. При этом длительность восстановления коэффициента усиления КПУ после включения накачки будет больше, чем в отсутствие насыщающих импульсов. При воздействии зондирующих импульсов в момент времени, когда $\Delta n_{32} = 0$ (рис. 1), состояние квантовой системы не изменится (число индуцированных переходов сверху вниз и обратно будет одинаковым), и скорость восстановления коэффициента усиления после повторного включения не будет зависеть от воздействия мощных импульсов (рис. 2 а).

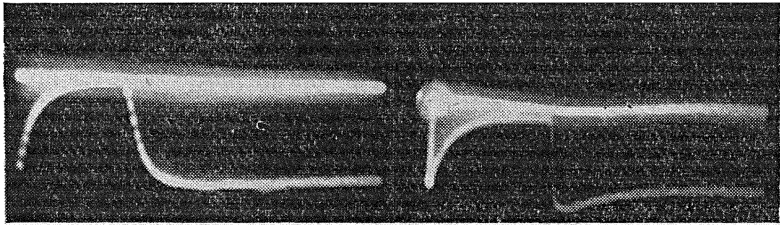


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов в КПУ при выключении и включении накачки с длительностью паузы
а) 25 мсек (развертка 100 мсек);
б) 100 мсек (развертка 300 мсек).

Измеренное таким образом значение $\tau \approx 25$ мсек. Это соответствует значению $\tau/T_1 \approx 0,9$. Из (2) находим $I_{\text{стац}} \approx 1,4$, что несколько меньше расчетного начального значения $I_0 = \nu_n/\nu_c - 1 \approx 1,5$.

Определение $I_{\text{стац}}/I_0$ вторым способом, т. е. по картине переходного процесса после включения накачки, проводилось, исходя из рис 2 б. На этой осциллограмме зафиксирована картина переходного процесса восстановления усиления КПУ при повторном включении накачки после паузы длительностью 100 мсек. За 100 мсек спин-система приходит в состояние термодинамического равновесия. Как видно из осциллограммы, начальное значение коэффициента усиления больше стационарного значения приблизительно на 15%. Это соответствует $I_{\text{стац}}/I_0 \approx 0,95$ и $I_{\text{стац}} \approx 1,4$, что находится в согласии с результатом измерения $I_{\text{стац}}$ первым способом.

ЛИТЕРАТУРА

1 А Е Сигмен, сб Мазеры, изд Мир, М, 1966

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
16 октября 1968 г.

NONSTATIONARY METHODS OF MEASURING THE INVERSION COEFFICIENT OF THE ACTIVE MATTER IN QUANTUM PARAMAGNETIC AMPLIFIERS

Ya. L. Shamfarov, N. T. Cherpak

Two methods of defining the stationary value of the inversion coefficient of the active matter in a quantum paramagnetic amplifier are proposed and studied according to the patterns of transient processes taking place in switching on and off the pumping power.