

значений скорости встречного движения. При $\delta = 1$ и $\Lambda = 0,01$ ($\beta_1 \approx -0,7$) значение $\tilde{R}_0(\beta_1) \approx 850$, а $\tilde{R}_0(-1) \approx 25$.

Пропускная способность тонкого сгустка ($\omega_p c^{-1} a' \ll 1$, где a' — толщина сгустка в его системе покоя) $\tilde{T} \approx 1$ почти везде внутри области непропускания и резко спадает к нулю при приближении к точке синхронизма β_0 . С увеличением толщины сгустка ($\omega_p c^{-1} a' \gg 1$) $\tilde{T} \approx 0$ везде внутри области непропускания. Вне области при $q \gg 1$ $\tilde{T} \sim 1$.

Таким образом, эффективность умножения частоты при отражении волны от движущегося сгустка при наличии волновода может быть очень высокой даже при нерелятивистских скоростях движения сгустка.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Файнберг Я. Б., Ткалич В. С. — ЖТФ, 1959, 29, № 4, с. 491.
- 2 Курилко В. И. — ЖТФ, 1961, 31, № 8, с. 899.
- 3 Уее Н. У. — IEEE, 1971, MTT-19, № 4, р. 400.
- 4 Мирошниченко В. И. — ЖТФ, 1973, 43, № 3, с. 467.
- 5 Уей С. — J. Appl. Phys, 1976, 37, № 8, р. 3079.
- 6 Нерух А. Г., Хижняк Н. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 10, с. 1492.
- 7 Нерух А. Г., Хижняк Н. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 5, с. 517.

Харьковский институт радиоэлектроники

Поступила в редакцию
18 января 1983 г.

УДК 621.375 8

РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ КВАНТОВЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

И. И. Бру, В. В. Мышенко, С. А. Песковацкий

1. В литературе неоднократно рассматривались различные варианты расширения полосы частот квантовых парамагнитных усилителей (КПУ). В частности, были изучены возможности расширения полосы резонаторного КПУ, открывающиеся при использовании многорезонансной системы с несколькими связанными между собой активными и пассивными резонаторами. Однако такие конструкции, очень сложные в настройке и эксплуатации, не дали сколь-нибудь существенного увеличения полосы частот КПУ. Поэтому основное внимание в дальнейшем было уделено КПУ бегущей волны (КПУБВ) как более широкополосным системам.

Наиболее удовлетворительным решением проблемы расширения полосы КПУБВ явилось применение распределенной расстройки активного кристалла неоднородным магнитным полем [1-3].

Эксперименты с применением магнитной расстройки в КПУБВ показали, что даже на кристаллах с относительно узкими линиями ЭПР (рубин, рутил) этот метод позволяет получать в сантиметровом диапазоне полосы частот до 200—500 МГц [4, 5].

При любой форме магнитной расстройки активного кристалла происходит расширение линии ЭПР, что приводит к уменьшению магнитного декремента и соответствующему падению погонного усиления. Поэтому возможности расширения полосы частот КПУБВ путем магнитной расстройки ограничены, в пределе, уровнем погонного усиления, сравнимым с погонными потерями в замедляющей системе. С этой точки зрения переход в миллиметровый диапазон, где магнитный декремент, а следовательно, и погонное усиление на порядок выше, чем в сантиметровом диапазоне, должен существенно расширить возможности применения магнитной расстройки в КПУБВ. Кроме того, практически неизученным является вопрос о магнитной расстройке резонаторных КПУ.

Учитывая это, мы провели анализ амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) магнитно-расстроенных КПУ миллиметрового диапазона как бегущей волны, так и однорезонаторных усилителей.

2. Амплитудно-частотная характеристика резонаторного КПУ определяется, в основном, дисперсионной характеристикой активного кристалла и резонатора. Форма линии поглощения сказывается здесь сравнительно слабо. В КПУБВ, наоборот, АЧХ

определяется формой линии поглощения, а дисперсионная характеристика кристалла здесь не существенна. Таким образом, для анализа АЧХ этих двух типов КПУ необходимо знать как форму линии поглощения, так и форму дисперсионной характеристики активного кристалла.

Ниже будут проанализированы три возможных пути расширения полосы усиления КПУ: расстройка неоднородным магнитным полем, разориентация магнитных комплексов в однородном поле и комбинация двух первых случаев — разориентация магнитных комплексов, дополненная распределенной магнитной расстройкой.

Распределенная магнитная расстройка. В активных кристаллах КПУ концентрация парамагнитных примесей, как правило, очень низкая — не более 0,1%. При таком сильном диамагнитном разбавлении форма линии ЭПР оказывается достаточно близкой к лоренцевской,

$$\chi'' = \chi_0 / (1 + \delta^2),$$

где $\delta \equiv 2\Delta f / \Delta f_{л}$, $\Delta f = f_0 - f$, $\Delta f_{л}$ — ширина линии ЭПР, f_0 — центральная частота линии ЭПР.

В соответствии с этим интенсивность сигнала дисперсии будет равна

$$\chi' = \chi_0 \delta / (1 + \delta^2).$$

Рассмотрим случай, когда магнитное поле в объеме кристалла изменяется вдоль некоторого направления \mathbf{r} от величины $H_0 - \Delta H$ до значения $H_0 + \Delta H$. Такое изменение магнитного поля приведет к соответствующей пространственной расстройке резонансных частот ЭПР в кристалле — от $f_0 - \Delta f_0$ до $f_0 + \Delta f_0$.

В этих условиях вклад в поглощение и дисперсию от части кристалла толщиной dr можно представить в виде

$$dI_{\Pi} = \int \frac{dr}{1 + [\delta - \omega(r)]^2} ds, \quad dI_{\Delta} = \int \frac{[\delta - \omega(r)] dr}{1 + [\delta - \omega(r)]^2} ds,$$

где $\omega(r) \equiv 2\Delta f_0(r) / \Delta f_{л}$, а интеграл берется по сечению кристалла, перпендикулярному направлению \mathbf{r} .

Для частного случая, когда градиент поля постоянен и направлен вдоль одного из ребер прямоугольного кристалла,

$$I_{\Pi} = (1/2\Omega) [\arctg(\delta + \Omega) - \arctg(\delta - \Omega)]; \quad (1)$$

$$I_{\Delta} = (1/4\Omega) \ln \{ [1 + (\delta + \Omega)^2] / [1 + (\delta - \Omega)^2] \}, \quad (2)$$

где $\Omega \equiv 2\Delta f_0 / \Delta f_{л}$, $\Delta f_0 = \gamma l \text{ grad } H$, l — размер кристалла вдоль градиента поля, γ — коэффициент пропорциональности.

Разориентация магнитных комплексов. При наличии в магнитном кристалле двух магнитных комплексов разориентация их дает

$$I_{\Pi} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + (\delta + a)^2} + \frac{1}{1 + (\delta - a)^2} \right]; \quad (3)$$

$$I_{\Delta} = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta + a}{1 + (\delta + a)^2} + \frac{\delta - a}{1 + (\delta - a)^2} \right], \quad (4)$$

где $a \equiv \Delta f_{12} / \Delta f_{л}$, $\Delta f_{12} = |f_{10} - f_{20}|$ — ориентационная расстройка резонансных частот ЭПР магнитных комплексов

Разориентация магнитных комплексов, дополненная магнитной расстройкой. В этом случае, согласно (1) — (4),

$$I_{\Pi} = (1/4\Omega) [\arctg(\delta + a + \Omega) - \arctg(\delta + a - \Omega) + \arctg(\delta - a + \Omega) - \arctg(\delta - a - \Omega)]; \quad (5)$$

$$I_{\Delta} = \frac{1}{8\Omega} \ln \left\{ \frac{[1 + (\delta + a + \Omega)^2] [1 + (\delta - a + \Omega)^2]}{[1 + (\delta + a - \Omega)^2] [1 + (\delta - a - \Omega)^2]} \right\}. \quad (6)$$

3. Однорезонаторный магнитно-расстроенный КПУ. Амплитудно-частотную характеристику однорезонаторного магнитно-расстроенного КПУ можно описать выражением [1]

$$G(\delta) = \frac{[R_{\Pi} + R(\delta)]^2 + [X(\delta)]^2}{[R_{\Pi} - R(\delta)]^2 + [X(\delta)]^2},$$

где R_n — сопротивление нагрузки КПУ, а $R(\delta)$ и $X(\delta)$ — действительная и мнимая части импеданса резонатора, содержащего активный кристалл,

$$R(\delta) = R_0 + R_m(\delta)J; \quad (7)$$

$$X(\delta) = [R_0 + R_m(0)](\delta/d'_{m0} Q_{L0} J) + X_m(\delta). \quad (8)$$

Здесь Q_{L0} — добротность линии ЭПР в отсутствие расстройки, $d'_{m0} = d_{m0} - d_0$, d_0 — собственный декремент резонатора, J — коэффициент инверсии, d_{m0} — магнитный декремент активного кристалла в отсутствие расстройки, R_m — парамагнитные потери в кристалле, R_0 — собственные потери резонатора, X_m — дисперсия парамагнитных потерь

Значения $R_m(\delta)$ и $X_m(\delta)$ вычисляются по соответствующим формулам (1)–(6)

Магнитно-расстроенный КПУ бегущей волны. Амплитудно-частотную характеристику магнитно-расстроенного КПУБВ можно описать известным выражением [1].

$$G(\delta)_{\partial B} = 27,3 S(l/\lambda_0)(Jd_m \eta - d_{3c}),$$

где S — замедление групповой скорости в замедляющей системе, l — длина замедляющей системы, λ_0 — длина волны в свободном пространстве, J — коэффициент инверсии, η — коэффициент заполнения, $d_m = d_{m0} J_{11}(\delta)$ — магнитный декремент магнитно-расстроенного кристалла, d_{m0} — магнитный декремент кристалла в отсутствие магнитной расстройки, d_{3c} — потери в замедляющей системе.

Магнитный декремент d_m вычисляется для каждого конкретного случая магнитной расстройки с помощью одного из выражений (1), (3) или (5).

Численные оценки, проведенные с помощью полученных выражений для КПУ на кристаллах андалузита с примесью трехвалентного железа, показывают, что в миллиметровом диапазоне на основе этих кристаллов можно разработать однорезонаторный КПУ с полосой частот до 100–130 МГц и КПУБВ с полосой до 250 МГц (при длине замедляющей системы не более 25–30 мм). Эти результаты свидетельствуют о реальных возможностях создания в миллиметровом диапазоне сравнительно несложных и достаточно широкополосных маломощных входных усилителей.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сигмен А Мазеры — М: Мир, 1965
- 2 Mc Evoy J. P., Miller D. J., Morris L. C. — Sol. St. Electron., 1965, 6, № 8, p. 443
- 3 Morris L. C., Miller D. J., Weidner G. G., Johnson C. C. — Microwave J., 1968, 11, № 6, p. 55.
- 4 Moore C. R., Clauss R. C. — IEEE Trans., 1979, 27, № 3, p. 249.
- 5 Moore C. R. — IEEE Trans., 1980, 28, № 2, p. 149.
- 6 Eru I. I., Peskovatskiy S. A., Chernets A. N. — IEEE J. Quant. Electron., 1968, 4, № 11, p. 723.

Институт радиофизики
и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
21 июля 1982 г.

УДК 539 535 4

ОБ АНИЗОТРОПИИ КОЭФФИЦИЕНТА СПИНОВОЙ ДИФФУЗИИ В УСЛОВИЯХ МАГИЧЕСКОГО УГЛА

И. А. Виноков, Р. Х. Сабиров

В работах [1, 2] экспериментально показано, что даже в условиях магического угла ядерная спиновая диффузия играет важную роль при релаксации ядер через парамагнитную примесь. В этих условиях секулярная часть ядерного спин-спинового взаимодействия обращается в нуль, и диффузия может быть обусловлена лишь несекулярными взаимодействиями ядерных спинов. Подробное исследование спиновой диффузии как вблизи, так и в условиях магического угла проведено в [3]. Цель настоящей работы состоит в численной оценке коэффициента спиновой диффузии в условиях магического угла при различных ориентациях внешнего магнитного поля относительно внутрикристаллических осей кристалла. Такая оценка позволит ответить и на вопрос о характере анизотропии коэффициента спиновой диффузии в условиях магического угла. Подчеркнем, что, как показывает расчет [4–6], в обычных условиях спиновая диффузия по существу является изотропной.