

**А. Р. Сафин, А. А. Бобурков** (Москва, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН; Москва, НИУ «МЭИ»). **Ширина спектральной линии антиферромагнитного спинтронного осциллятора.**

УДК 538.915

*Резюме:* В работе исследована математическая модель антиферромагнитного спинтронного осциллятора, работающего в терагерцовом диапазоне частот и перестраиваемого по частоте постоянным электрическим током. Рассчитана ширина спектральной линии осциллятора в закритической области при наличии тепловых флуктуаций с нормальным распределением вероятности. Обсуждены методы уменьшения ширины спектральной линии осциллятора и стабилизации частоты с помощью внешнего воздействия.

*Ключевые слова:* антиферромагнетики, антиферромагнитный спинтронный осциллятор, спиновый эффект Холла, спиновый транспорт.

В настоящее время существует проблема с отсутствием генераторов и детекторов, работающих в диапазоне частот от 300 ГГц до 30 ТГц при комнатной температуре с возможностью перестройки по частоте. Подходящими активными элементами для потенциальных приложений в терагерцовой электронике являются антиферромагнетики (АФМ) [1], резонансные частоты которых лежат в терагерцовой области. В [2] была описана математическая модель спинтронного антиферромагнитного осциллятора, представляющая из себя дифференциальное уравнение для вектора Нееля  $l$  в АФМ следующего вида:

$$l \times \left[ \frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \frac{d^2 l}{dt^2} + \alpha_G \frac{dl}{dt} + \Omega \cdot l + \tau [p \times l] \right] = f_T, \quad (1)$$

где  $\omega_{\text{ex}}$  — обменная частота АФМ,  $\alpha_G$  — постоянная затухания Гильберта,  $\Omega = \omega_{\text{ani}} n_a \otimes n_a$  и  $\omega_{\text{ani}}$  — частота анизотропии АФМ в легкой плоскости,  $n_a = x$  — орт направления легкой оси и  $\otimes$  — тензорное произведение векторов,  $\tau$  — константа переноса спинового момента из тяжелого металла в АФМ,  $p = -z$  — направление спиновой поляризации тока в тяжелом металле и  $f_T$  — вектор тепловых флуктуаций в АФМ. Переходя от уравнения (1) для  $l$  к уравнениям  $\theta, \phi$  в сферических координатах можно получить два уравнения маятникового типа [2], из анализа которых следует, что  $\theta \approx \pi/2$  (то есть вектор Нееля вращается в легкой плоскости), а динамика полярного угла  $\phi(t)$  задается уравнением

$$\frac{1}{\omega_{\text{ex}}} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \alpha_G \frac{d\phi}{dt} + \frac{\omega_{\text{ani}}}{2} \sin(2\phi) = \tau + f_\phi(t). \quad (2)$$

Здесь  $f_\phi(t)$  — эквивалентный белый гауссовский шум со следующими свойствами [3, 4]:

$$M(f_\phi(t)) = 0; \quad M(f_\phi(t_1)f_\phi(t_2)) = 2D\delta(t_2 - t_1), \quad (3)$$

где  $D$  — дисперсия шума, определяющая эффективную амплитуду шумовых флуктуаций,  $M(\cdot)$  — оператор математического ожидания. При этом дисперсия прямо про-

порциональна Гильбертову затуханию АФМ и отношению мощности тепловых флуктуаций к мощности колебаний.

Далее применяя стандартный в теории колебаний [4] метод медленно меняющихся амплитуд можно перейти к уравнениям для амплитуды  $A_\phi(t)$  и фазы  $\Phi_\phi(t)$  автоколебаний с учетом действия флуктуационной составляющей  $f_\phi(t)$ . В режиме установившихся автоколебаний находятся линеаризованные уравнения для девиаций амплитуды  $\delta A_\phi$  и фазы  $\delta \Phi_\phi$ , из которых находятся спектральные плотности [4] мощности амплитудных и фазовых флуктуаций. Из полученных выражений находится ширина спектральной линии  $\Delta\omega$  по уровню 0,7, которую можно представить в виде

$$\Delta\omega = \frac{4\gamma k_B T}{\alpha_G M_0 V_{eff}}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура образца,  $M_0$  — намагниченность насыщения АФМ,  $V_{eff}$  — эффективный объем образца. Ширина спектральной линии для типичных в спинтронных экспериментах параметрах на частоте колебаний в 1 ТГц для оксида никеля составляет 0,36 МГц, что соответствует добротности порядка  $10^6$ . Уменьшение ширины спектральной линии и улучшение неустойчивости частоты АФМ осциллятора может быть обеспечено за счет стабилизации частоты внешним высокостабильным (например, на диэлектрическом резонаторе) гармоническим источником или с помощью схемы фазовой автоподстройки частоты [4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин А. Р., Никитов С. А., Кириллюк А. И., Калябин Д. В., Садовников А. В., Стреломухов П. А., Логунов М. В., Попов П. А. Возбуждение терагерцевых магновов в антиферромагнитных наноструктурах: теория и эксперимент. — ЖЭТФ, 2020, т. 158, в. 1(7), с. 85–99. Rev. Mod. Phys., 2018, v. 90, p. 015005.
2. Khytyn R., Lisenkov I., Tiberkevich V., Ivanov B. A., Slavin A. Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current. — Sci. Rep., 2017, v. 7, p. 43705.
3. Slavin A., Tiberkevich V. Nonlinear auto-oscillator theory of microwave generation by spin-polarized current. — IEEE. Trans. on Magn., 2009, v. 45, № 4, p. 1875–1918.
4. Митрофанов А. А., Сафин А. Р., Удалов Н. Н. Амплитудные и фазовые шумы спин-трансферного наноосциллятора, синхронизированного системой фазовой автоподстройки частоты. — Письма в ЖТФ, 2015, т. 41, в. 16, с. 29–35.

УДК 538.915

**Safin A. R., Boburkov A. A.** (Moscow, Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS; Moscow, National Research University "MPEI"). **Spectral linewidth of the antiferromagnetic spintronic oscillator**

*Abstract:* In this work, a mathematical model of an antiferromagnetic spintronic oscillator operating in the terahertz frequency range and tuned by the electric current was investigated. The spectral linewidth of the oscillator in the subcritical regime is calculated in the presence of thermal fluctuations with a normal probability distribution. Methods of oscillator spectral linewidth reduction and frequency stabilization using external influence were discussed.

*Keywords:* antiferromagnets, antiferromagnetic spintronic oscillator, spin-Hall effect, spin transport.