

А. Р. Сафин (Москва, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН; Москва, НИУ «МЭИ»). **Выпрямление терагерцовых сигналов с помощью антиферромагнитных наногетероструктур.**

УДК 538.915

Резюме: В работе предложена схема и исследована математическая модель резонансного, перестраиваемого по частоте приемника терагерцовых электромагнитных волн на основе гетероструктуры, состоящей из нанослоев антиферромагнетика (АФМ) и тяжелого металла (ТМ). Показано, что чувствительность к электромагнитному полю детектора сравнима с чувствительностью современных терагерцовых детекторов.

Ключевые слова: антиферромагнетики, терагерцовый детектор, спиновый эффект Холла, спиновый транспорт.

Возбуждение и детектирование терагерцовых электромагнитных волн в антиферромагнитных наноструктурах является важным направлением спинтроники [1]. В [2] двуслойная гетероструктура, состоящая из слоев антиферромагнетика (АФМ) и тяжелого металла (ТМ) использовалась для генерации терагерцовых колебаний за счет протекания через них спин-поляризованного тока высокой плотности порядка 10^8 А/см². В данной работе теоретически исследуется математическая модель динамики вектора Нееля l в АФМ, находящегося во внешнем электромагнитном поле с компонентами $E(t) = (\cos \alpha_p, \sin \alpha_p, 0) \cdot E(t)$ и $H(t) = (-\sin \alpha_p, \cos \alpha_p, 0) \cdot H(t)$, где угол α_p определяет ориентацию плоскости поляризации ЭМ-волны, а функции времени $E(t), H(t)$ задают профиль терагерцового сигнала. Для пространственно-однородного возбуждения АФМ динамики в сферической системе координат (θ, φ) функции Лагранжа \mathcal{L} и Рэлея \mathcal{R} имеют следующий вид [1]:

$$\mathcal{L}(\theta, \varphi) = \frac{M_0}{2\gamma^2 H_{\text{ex}}} \left(\left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \sin^2 \theta \right) - \mathcal{U}(\theta, \varphi) \quad (1)$$

и

$$\mathcal{R}(\theta, \varphi) = \frac{\alpha_G M_0}{2\gamma} \left(\left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \sin^2 \theta \right). \quad (2)$$

Здесь M_0 — намагниченность насыщения подрешеток АФМ, H_{ex} — обменное поле, γ — гиромагнитное отношение, α_G — константа затухания Гильберта, $\mathcal{U}(\theta, \varphi)$ — обобщенная потенциальная энергия АФМ, которую можно представить так $\mathcal{U}(\theta, \varphi) = U_a + U_m + U_s + U_t$, где U_a, U_m, U_s, U_t описывают энергии кристаллографической анизотропии, взаимодействия с эффективным магнитным полем, спин-фотонного взаимодействия с полем E и динамический вклад с переменным магнитным полем H , соответственно [1].

При анализе нелинейной динамики АФМ под действием ЭМ-поля необходимо исследовать динамику двух нормальных мод, которые проявляются как осцилляции угловых переменных θ, φ , происходящие под действием вынуждающих моментов сил

S_θ, S_φ . Пропуская промежуточные выкладки (см. подробнее [1]), уравнения Эйлера-Лагранжа для функции (1) с учетом (2) представимы в виде:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \alpha_G \omega_{\text{ex}} \frac{d\varphi}{dt} + \omega_1^2 \sin(\varphi - \alpha_p) = \omega_{\text{ex}} \cdot \frac{\kappa\gamma}{2\pi M_0} E^2(t) \sin^2 \theta \sin(2\varphi - 2\alpha_p) \quad (3)$$

и

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \alpha_G \omega_{\text{ex}} \frac{d\theta}{dt} + \omega_2^2 \frac{\sin(2\theta)}{2} = \gamma \frac{\partial}{\partial \theta} \left(H(t) \cdot \left[l \times \frac{dl}{dt} \right] \right), \quad (4)$$

где $\omega_{\text{ex}} = \gamma H_{\text{ex}}$, $\omega_1 = \sqrt{\gamma H \omega_{\text{ex}}}$ — частота резонанса квазиферромагнитной моды, $\omega_2 = \sqrt{\gamma H_a \omega_{\text{ex}}}$ — частота резонанса антиферромагнитной моды, H_a — поле анизотропии АФМ, H — внешнее магнитное поле, κ — константа линейного магнитного двулучепреломления (определяется экспериментально). Минимум потенциальной энергии \mathcal{U} в отсутствие внешнего воздействия реализуется при $\varphi_0 = \pi/2$ и $\theta_0 = \pi/2$. Из уравнений (3), (4) можно найти отклики $\varphi_{\sim} = A_{\sim} \sin(\omega_0 t + \Phi_A)$, $\theta_{\sim} = B_{\sim} \sin(\omega_0 t + \Phi_B)$ на малые воздействия $E(t) = E_0 \sin(\omega_0 t)$ и $H(t) = H_0 \sin(\omega_0 t)$.

Прецессия вектора Нееля в АФМ создает спиновый ток из АФМ в ТМ $j_{\text{sp}} \sim [l \times \frac{dl}{dt}]$, который преобразуется в ТМ в электрический ток за счет обратного спинового эффекта Холла. Соответствующее напряжение на концах ТМ V_{out} имеет постоянную V_{dc} и переменную V_{ac} составляющие. При выборе в качестве АФМ оксида никеля, а ТМ платины для типичных в экспериментах по спинтронике параметров можно показать, что значение выходного постоянного напряжения имеет порядки 100 мкВ для мощности входного сигнала 100 нВт. Такие уровни выходных напряжений и выходной мощности задают чувствительность детектора в 1000 В/Вт, что сравнимо с чувствительностью современных терагерцевых детекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин А. Р., Никитов С. А., Кирилук А. И., Калябин Д. В., Садовников А. В., Стремоухов П. А., Логунов М. В., Попов П. А. Возбуждение терагерцевых магнонов 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.

УДК 538.915

Safin A. R. (Moscow, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS; Moscow, National Research University "MPEI"). **Rectification of terahertz signals based on the antiferromagnetic nanoheterostructures.**

Abstract: In this paper we propose a scheme and investigate a mathematical model of a resonant, frequency-tunable detector of terahertz electromagnetic waves based on a heterostructure consisting of antiferromagnet nanolayers (AFM) and heavy metal (TM). We show that the sensitivity to the electromagnetic field of the detector is comparable to the sensitivity of modern detectors based on Schottky and Gunn diodes.

Keywords: antiferromagnets, terahertz detector, spin-Hall effect, spin transport.