

## ДИНАМИКА ВОЛНЫ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ В КВАЗИОДНОМЕРНОМ ПРОВОДНИКЕ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАЗБРОСЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОРОГОВОГО ПОЛЯ

*И.Б.Вендик, В.М.Пчелкин, А.В.Щепак*

Экспериментальные результаты по исследованию отклика волны зарядовой плотности в квазиодномерном проводнике  $NbSe_3$  на слабое СВЧ излучение в присутствии СВЧ накачки и постоянного смещения удовлетворительно описываются в рамках классической модели жесткого осциллятора при усреднении величины отклика с использованием функции распределения по пороговому полю.

Динамике волны зарядовой плотности (ВЗП) в присутствии постоянного и переменного полей посвящено большое число исследований. Основная часть экспериментальных работ по изучению нелинейного динамического отклика ВЗП выполнена на трихалькогенидах переходных металлов  $NbSe_3$  и  $TaS_3$ <sup>1-3</sup>. Как правило, исследуется отклик ВЗП на воздействие двух переменных сигналов с частотами  $\omega$  и  $2\omega$  при постоянном смещении (режим смесителя гармоник). Интерпретация результатов исследования проводится на базе туннельной модели движения ВЗП с использованием концепции фотонно-стимулированного туннелирования<sup>4</sup>. Имеется удовлетворительное количественное совпадение результатов эксперимента и расчета на основе этой модели в мегагерцевом диапазоне<sup>2</sup>. Проведенный в<sup>1</sup> анализ отклика ВЗП в режиме смесителя гармоник на СВЧ на основе туннельной модели представляется некорректным, поскольку модель не учитывает дисперсию электропроводности ВЗП в СВЧ диапазоне<sup>5</sup>. Дисперсия электропроводности ВЗП в широком частотном диапазоне (вплоть до миллиметрового) описывается классической моделью жесткого осциллятора<sup>6</sup>. Наилучшее совпадение экспериментальной частотной зависимости электропроводности  $\sigma(\omega)$  с расчетной получено при введении функции распределения для частоты пиннинга  $\omega_0$ , используемой как параметр в модели осциллятора, и усреднения  $\sigma(\omega)$  по  $\omega_0$ <sup>7,8</sup>.

Воспользуемся идеей усреднения  $\sigma(\omega)$  применительно к случаю нелинейного динамического отклика ВЗП на воздействие СВЧ излучения. Используем феноменологическую модель жесткого осциллятора <sup>6</sup>. Будем исходить из предположения, что каждая цепочка в квазиодномерном проводнике представляет собой последовательность отдельных не взаимодействующих доменов ВЗП, каждый из которых характеризуется своей частотой пиннинга <sup>8</sup>. Между частотой пиннинга  $\omega_0$  и напряженностью порогового поля домена  $E_{\text{пор}}$  существует однозначная связь. Введем функцию распределения порогового поля:

$$P(E_{\text{пор}}) = \frac{1}{E^*} \left( \frac{E_{\text{пор}}}{E^*} \right)^n e^{-E_{\text{пор}}/E^*} \quad (1)$$

где  $E^*$  и  $n$  — параметры распределения.

Используем (1) для нахождения отклика ВЗП на СВЧ излучение в условиях, когда на образец воздействуют два СВЧ сигнала с близкими частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  и различными амплитудами напряженности электрического поля ( $E_2 \ll E_1$ ) при постоянном смещении  $E_0 \gg E_2$ . Отклик возникает в виде тока разностной частоты  $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ , который вызывает падение напряжения  $V_{\Omega} \cos(\Omega t + \psi)$  на сопротивлении нагрузки во внешней цепи.

При постановке задачи будем исходить из предположения, что ВЗП реагирует на сумму двух сигналов с близкими частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$  при  $E_2 \ll E_1$  как на один сигнал с медленно меняющейся амплитудой <sup>9</sup>:

$$e(t) = e_1(1 + m \sin \Omega t), \quad (2)$$

где

$$m = e_2/e_1 \quad (3)$$

$m \ll 1$ ;  $\omega_1 \approx \omega_2 = \omega$ ;  $e_1$  и  $e_2$  — нормированные к пороговому полю  $E_{\text{пор}}$  напряженности поля  $E_1$  и  $E_2$ . Такой постановке задачи соответствуют условия эксперимента <sup>10</sup>. Уравнение движения ВЗП на основе модели <sup>6</sup> с использованием (2):

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{1}{\omega_{c0}} \frac{d\theta}{dt} + \sin \theta = e_0 + e(t). \quad (4)$$

где  $\theta$  — фаза ВЗП,  $\omega_{c0} = \omega_0^2 \tau$ ,  $\tau$  — феноменологическая постоянная затухания. Для  $m \ll 1$  и  $\Omega \ll \omega$  решение (4) может быть найдено в виде

$$\theta = \theta_0 + \theta_m \sin \Omega t.$$

Ток ВЗП определяется производной  $d\theta/dt$ , которую необходимо усреднить по быстро переменным процессам. Такая задача решена в <sup>11</sup> для нахождения величины отклика ВЗП на воздействие слабого непрерывного СВЧ сигнала в виде приращения тока  $\Delta j_{\text{ВЗП}}$ . Подстановка в выражение для  $\Delta j_{\text{ВЗП}}$  модулированной амплитуды СВЧ сигнала  $e_m = e_1(1 + m \sin \Omega t)$  и разложение его в ряд по малому параметру  $m$  позволяет выделить переменную составляющую тока ВЗП, изменяющегося с частотой  $\Omega$ :

$$j_{\Omega} = \sigma_b E_{\text{пор}} \frac{m e_1^2}{2} \frac{1}{\sqrt{e_0^2 - 1}} f(\omega) \sin \Omega t \quad e_0 > 1, \quad (5)$$

где  $f(\omega) = (\omega/\omega_0)^4 [1 + (\omega\tau)^{-2}]$ ,  $\sigma_b$  — проводимость ВЗП, соответствующая максимуму на зависимости  $\text{Re}\sigma(\omega)$ .

Перейдем в (5) от плотности тока к току  $i_{\Omega} = j_{\Omega} S$  и от напряженности поля к напряжению  $V = El$  ( $l$  и  $S$  — длина и площадь поперечного сечения образца). Учтем, что при протекании тока  $i_{\Omega}$  через сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  полное напряжение на образце есть  $V_{\Sigma} = V_0 - i_{\Omega} R_{\text{н}}$ . Подставим  $V_{\Sigma}$  в (5) вместо  $V_0$ . Решая полученное уравнение относи-

тельно тока  $i_{\Omega}$ , найдем его амплитуду:

$$I_{\Omega} = \frac{V_1 V_2}{2V_0} f(\omega) \left( R_H + R_b \frac{\sqrt{V_0^2 - V_{\text{пор}}^2}}{V_0} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $V_0, V_1, V_2$  и  $V_{\text{пор}}$  — напряжение смещения, амплитуды напряжения переменных сигналов и пороговое напряжение соответственно;  $R_H = R_{\text{вн}} R_a / (R_{\text{вн}} + R_a)$ ,  $R_{\text{вн}}$  — сопротивление внешней нагрузки;  $R_a$  — электропроводность образца, обусловленная одночастичными возбуждениями;  $R_b$  — сопротивление, определяемое электропроводностью  $\sigma_b$ .

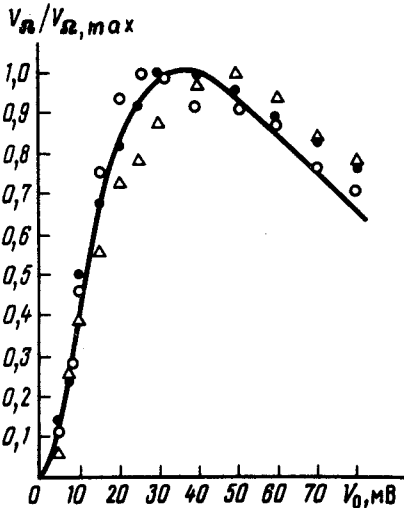
Из (6) следует, что ток  $I_{\Omega}$  определяется источником напряжения с ЭДС  $V = (V_1 V_2 / 2V_0) f(\omega)$  и внутренним сопротивлением  $R_i = R_b \sqrt{V_0^2 - V_{\text{пор}}^2} / V_0$ . Амплитуду напряжения отклика  $V_{\Omega} = I_{\Omega} R_H$  с использованием (6) удобно представить в виде:

$$V_{\Omega} = \frac{V_1 V_2}{2V_0} f(\omega) \varphi(E_0, E_{\text{пор}}), \quad (7)$$

где

$$\varphi(E_0, E_{\text{пор}}) = \begin{cases} 0 & E_0 < E_{\text{пор}} \\ \frac{\alpha_R E_0}{\alpha_R E_0 + \sqrt{E_0^2 - E_{\text{пор}}^2}} & E_0 > E_{\text{пор}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha_R = R_H / R_b.$$



Зависимость нормированной амплитуды напряжения отклика ВЗП на СВЧ излучение от напряжения смещения. Сплошная кривая — расчет; эксперимент соответствует разным уровням мощности накачки (мкВт):  $\circ$  — 40;  $\bullet$  — 110;  $\Delta$  — 200. Частота напряжения отклика  $\Omega / 2\pi = 36$  МГц

Функция (8) имеет разрыв при  $E_0 = E_{\text{пор}}$ , в то же время экспериментальный отклик является гладкой функцией  $E_0$ . Произведем усреднение отклика (7) по множеству доменов ВЗП, различающихся  $E_{\text{пор}}$ , с использованием функции распределения (1):

$$V_{\Omega} = \frac{V_1 V_2}{2V^*} f(\omega) \overline{\varphi(E_0, E_{\text{пор}})}, \quad (9)$$

где

$$\overline{\varphi(E_0, E_{\text{пор}})} = \frac{\alpha_R a}{2} \int_0^a \frac{x^n e^{-x}}{\alpha_R a + \sqrt{a^2 - x^2}} dx, \quad (10)$$

$$x = E_{\text{пор}} / E^*, \quad a = E_0 / E^*, \quad V^* = E^* l.$$

Сопоставим полученный результат с экспериментом<sup>10</sup>. На рисунке представлены экспериментальные зависимости отклика ВЗП на СВЧ излучение мощностью  $10^{-8}$  Вт и частотой 3,3 ГГц образца  $\text{NbSe}_3$  при  $T = 35$  К для различных уровней мощности накачки  $P_{\text{нак}}$ . Амплитуда отклика для каждого уровня  $P_{\text{нак}}$  нормирована к своему максимальному значению. Здесь же сплошной линией представлена нормированная к максимуму расчетная зависимость (9), полученная численным интегрированием (10).

Для количественной оценки отклика принято экспериментальное значение  $\alpha_R = 1$  и  $f(\omega) = (\omega_{c0}/\omega)^2$ ,  $\omega_{c0}/2\pi = 0,1$  ГГц<sup>12</sup>. В качестве подгоночных параметров использованы  $n = 2$  и  $V^* = 11$  мВ. Измеренное значение статического порогового напряжения образца  $V_{\text{пор}} = 6$  мВ. Абсолютные значения амплитуды измеренного напряжения  $V_{\Omega}$  и рассчитанного по формуле (9) находятся в пределах одного порядка.

Таким образом, введение статистического распределения напряженности порогового поля получает экспериментальное подтверждение. Динамика ВЗП в нелинейном режиме удовлетворительно описывается в рамках феноменологической модели классического жесткого осциллятора.

Авторы приносят благодарность Капаркову Д.И. за участие в обработке результатов расчета и эксперимента.

#### Литература

1. Seeger K., Mayr W., Philipp A. Sol. St. Comm., 1982, **43**, 113.
2. Miller J.H., Thorne R.E., Lyons W.G. et al. Phys. Rev. B, 1985, **31**, 5229.
3. Thorne R.E., Lyons W.G., Lyding J.W. et al. Phys. Rev. B, 1987, **35**, 6348.
4. Miller J.H., Richard Jr. J., Tucker J.R., Bardeen J. Phys. Rev. Lett., 1983, **51**, 1592.
5. Sridhar S., Reagor D., Gruner G. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**, 1196.
6. Gruner G., Zawadowski A., Chaikin P.M. Phys. Rev. Lett., 1981, **46**, 511.
7. Reagor D., Sridhar S., Gruner G. Phys. Rev. B, 1986, **34**, 2212.
8. Tucker J.R., Lyons W.G., Gammie G. Phys. Rev. B, 1988, **38**, 1148.
9. Лухарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985, с. 320.
10. Вендик И.Б., Ермоленко А.Н., Пчелкин В.М. Письма в ЖЭТФ, 1988, **47**, 622.
11. Вендик И.Б. Письма в ЖТФ, 1984, **10**, 784.
12. Gruner G., Zettl A. Phys. Rev., 1985, **119**, 117.

Ленинградский электротехнический институт  
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию  
6 февраля 1989 г.