

Релаксация заряда и плазменные колебания в двумерной двухслойной системе

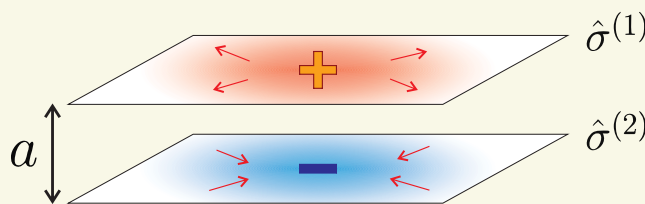
А.Л. Зибинский^{1,2}, С.А. Тарасенко^{2,1}

¹ Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, ² ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Рассматриваемая система

Два слоя с проводимостями $\hat{\sigma}^{(1)}$ и $\hat{\sigma}^{(2)}$ на малом расстоянии a друг от друга. Растекание заряда, плазменные колебания. Получены два независимых вклада: чётный «быстрый» и нечётный диффузный «медленный».

РАСТЕКАНИЕ ЗАРЯДА



Теория: уравнение неразрывности

В квазистатическом $\omega\tau \ll 1$ приближении с локальным откликом $\mathbf{j}^{(i)} = -\hat{\sigma}^{(i)} \nabla \varphi$, $i = 1, 2$, решается уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho^{(i)}}{\partial t} - \sigma_{\alpha\beta}^{(i)} \frac{\partial^2 \varphi^{(i)}}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} = 0, \quad i = 1, 2$$

Потенциал, например, в первом слое ($\mathbf{r} = (x, y)$):

$$\varphi^{(1)}(\mathbf{r}; t) = \int \frac{\rho^{(1)}(\mathbf{r}'; t)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^2 \mathbf{r}' + \int \frac{\rho^{(2)}(\mathbf{r}'; t)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}' + a\mathbf{e}_z|} d^2 \mathbf{r}'$$

В Фурье пространстве:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho_{\mathbf{k}}^{(1)} \\ \rho_{\mathbf{k}}^{(2)} \end{pmatrix} = -\frac{2\pi}{\varepsilon} \frac{1}{k} \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha\beta}^{(1)} k_\alpha k_\beta & \sigma_{\alpha\beta}^{(1)} k_\alpha k_\beta e^{-ak} \\ \sigma_{\alpha\beta}^{(2)} k_\alpha k_\beta e^{-ak} & \sigma_{\alpha\beta}^{(2)} k_\alpha k_\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_{\mathbf{k}}^{(1)} \\ \rho_{\mathbf{k}}^{(2)} \end{pmatrix}$$

Решение по теории возмущений $ka \ll 1$

- Плотность заряда разделяется на чётный и нечётный вклады:

$$\rho^\pm = \frac{\rho^{(1)} \pm \rho^{(2)}}{2}$$

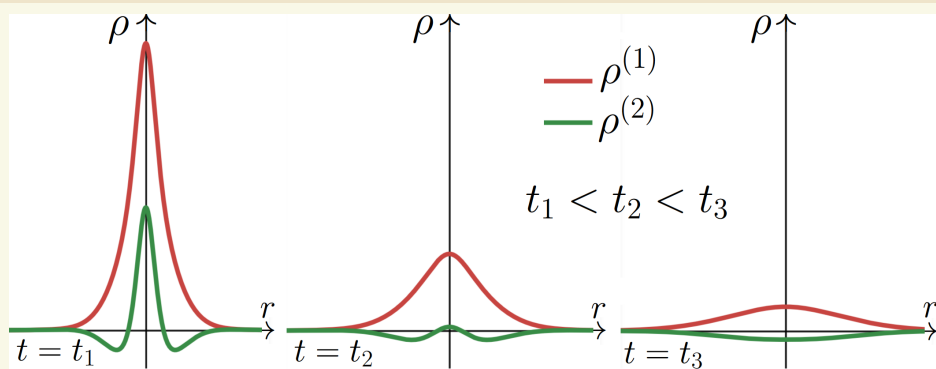
- Чётный вклад растекается со «скоростью» $\hat{v}$:

$$\rho_{\mathbf{k}}^+(t) = \rho_{\mathbf{k}}^+(0) \exp \left\{ -\frac{\nu_{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta}{k} t \right\}, \quad \hat{v} = \frac{2\pi}{\varepsilon} (\hat{\sigma}^{(1)} + \hat{\sigma}^{(2)})$$

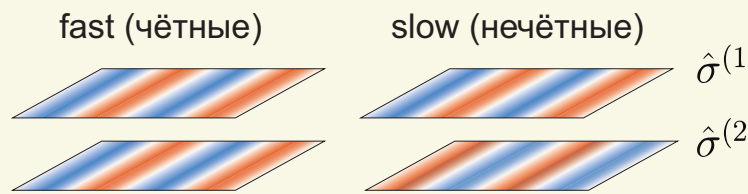
- Нечётный вклад диффундирует с коэффициентом диффузии $\hat{D}$:

$$\rho_{\mathbf{k}}^-(t) = \rho_{\mathbf{k}}^-(0) \exp \{ -D_{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta t \}, \quad \hat{D} = \frac{2\pi a}{\varepsilon} \frac{\hat{\sigma}^{(1)} + \hat{\sigma}^{(2)}}{2}$$

Релаксация дельта-заряда:



ПЛАЗМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ



Теория: дисперсионное уравнение

Собственные колебания быстрого и медленного вклада электронной плотности ищутся из уравнений:

$$\frac{\partial \rho_{\mathbf{k}}^+}{\partial t} + \frac{\nu_{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta}{k} \rho_{\mathbf{k}}^+ = 0, \quad \frac{\partial \rho_{\mathbf{k}}^-}{\partial t} + D_{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta \rho_{\mathbf{k}}^- = 0$$

при помощи подстановки $\rho_{\mathbf{k}}^+ \sim e^{-i\omega^+ t}$ и $\rho_{\mathbf{k}}^- \sim e^{-i\omega^- t}$ с учётом зависимости проводимостей $\hat{\sigma}^{(1)}$ и $\hat{\sigma}^{(2)}$ (т.е. и величин $\hat{v}$ и $\hat{D}$) от частоты ω .

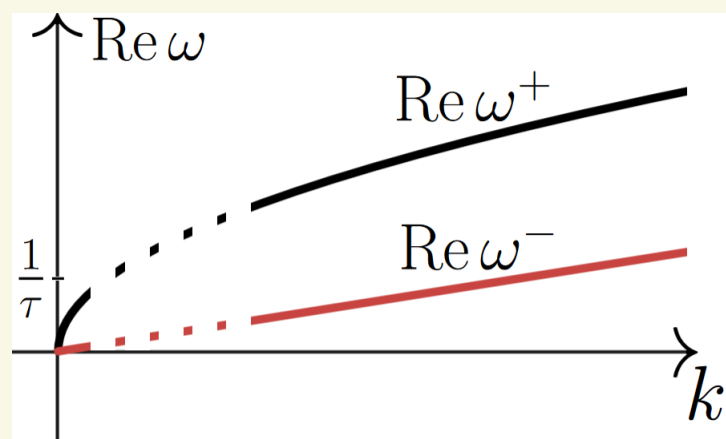
Пример: изотропная модель Друде

Пусть $\sigma^{(i)}(\omega) = \sigma_0^{(i)} / (1 - i\omega\tau^{(i)})$, $\sigma_0^{(i)} = n^{(i)} e^2 \tau^{(i)} / m^{(i)}$. При $\omega\tau^{(1,2)} \gg 1$:

$$\omega^+(k) = -i\gamma + \sqrt{k \cdot \frac{2\pi}{\varepsilon} \left(\frac{\sigma_0^{(1)}}{\tau^{(1)}} + \frac{\sigma_0^{(2)}}{\tau^{(2)}} \right)} = -i\gamma + \sqrt{k \cdot \frac{2\pi}{\varepsilon} \left(\frac{n^{(1)} e^2}{m^{(1)}} + \frac{n^{(2)} e^2}{m^{(2)}} \right)}$$

$$\omega^-(k) = -i\gamma + k \cdot \sqrt{\frac{2\pi a}{\varepsilon} \left(\frac{\sigma_0^{(1)}}{2\tau^{(1)}} + \frac{\sigma_0^{(2)}}{2\tau^{(2)}} \right)} = -i\gamma + k \cdot \sqrt{\frac{\pi a}{\varepsilon} \left(\frac{n^{(1)} e^2}{m^{(1)}} + \frac{n^{(2)} e^2}{m^{(2)}} \right)}$$

где затухание имеет порядок $\gamma \sim 1/(\tau^{(1)} + \tau^{(2)})$. Графики:



Пересечение законов дисперсии чётных и нечётных плазменных колебаний происходит при $ka = 2$, вне области применимости $ka \ll 1$.

Список литературы

- [1] М.И. Дьяконов, А.С. Фурман, ЖЭТФ 92, 1012 (1987)
- [2] I.V. Zagorodnev, A. A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, Nanomaterials 13, 975 (2023)
- [3] I. Safonov, A. S.Petrov, D. Svintsov, Письма в ЖЭТФ 119, 139 (2024)