

УРОВНИ ЛАНДАУ И ОСЦИЛЛЯЦИИ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ В ПОЛУМЕТАЛЛЕ ВЕЙЛЯ

Рышкевич А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Данилюк А.Л. – канд. физ.-мат. наук

Получены результаты моделирования уровней Ландау в полуметалле Вейля в скрещенных электрическом и магнитном полях. Продемонстрирован коллапс уровней Ландау. Получены результаты моделирования осцилляций плотности состояний в скрещенных полях.

В настоящее время исследование полуметаллов Вейля является актуальным вопросом в физике конденсированных сред. В данной работе рассмотрено влияние электрического поля на уровни Ландау вейлевского полуметалла. Используя микроскопический подход получены выражения для энергетического спектра и плотности состояний носителей заряда в скрещенных электрическом и магнитных полях, а также выражения для нулевого и ненулевого уровня Ландау. Рассмотрен Гамильтониан носителей заряда вблизи вейлевской точки [1]:

$$\hat{H} = v_{\perp} \sigma_x \hat{p}_x + v_{\perp} \sigma_y \hat{p}_y + v_{\square} \sigma_z \hat{p}_z, \quad (1)$$

где v_{\perp} — проекция скорости Ферми, перпендикулярная вектору магнитной индукции; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — матрицы Паули; $\hat{p}_x, \hat{p}_y, \hat{p}_z$ — компоненты оператора импульса; v_{\square} — проекция скорости Ферми, параллельная вектору магнитной индукции.

С учетом скрещенных электрического и магнитного поля в матричной форме гамильтониан носителей заряда преобразуется через минимальную замену и лоренц-инвариантности [1]:

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} v_{\square} \hat{p}_z + eEy & v_{\perp} \left(\hat{p}_x - \frac{e}{c} Hy - i\hat{p}_y \right) \\ v_{\perp} \left(\hat{p}_x - \frac{e}{c} Hy + i\hat{p}_y \right) & -v_{\square} \hat{p}_z + eEy \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где E — напряженность электрического поля; H — напряженность магнитного поля; c — скорость света в вакууме; e — элементарный заряд; y — ордината; i — мнимая единица.

Для решения волнового уравнения с гамильтонианом (2) необходимо перейти в систему отсчета, движущуюся со скоростью дрейфа, используя преобразования Лоренца:

$$\hat{p}_v = \Lambda_{v\mu} \hat{p}_{\mu}, \quad \Lambda_{v\mu} = \begin{pmatrix} \cosh \varpi & \sinh \varpi & 0 & 0 \\ \sinh \varpi & \cosh \varpi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tanh \varpi = \beta = \frac{cE}{v_{\perp} H} = \frac{v_d}{v_{\perp}}, \quad (3)$$

где $\Lambda_{v\mu}$ — метрический тензор; \hat{p}_v и \hat{p}_{μ} — операторы импульса в исходной и новой системах отсчета.

Получены собственные значения и собственные функции оператора Гамильтона в исходной системе отсчета:

$$\varepsilon = \operatorname{sgn}(n) \sqrt{2v_{\perp} \frac{\hbar^2}{2} \left(1 - \beta^2\right)^{\frac{3}{2}} |n| + v_{\square}^2 p_z^2 \left(1 - \beta^2\right) + v_d p_x}, \quad (4)$$

$$\psi_n = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{\frac{\sigma_x \varpi}{2} + \frac{i}{\hbar} (et - p_x x - p_z z)} \begin{pmatrix} \varphi_{n-1}(\xi) \\ i \operatorname{sgn}(n) \varphi_n(\xi) \end{pmatrix},$$

где n — номер уровня Ландау; φ_n — собственные функции квантового гармонического осциллятора, выраженные через полиномы Эрмита-Гаусса.

Уровни Ландау представлены на рисунке 1.

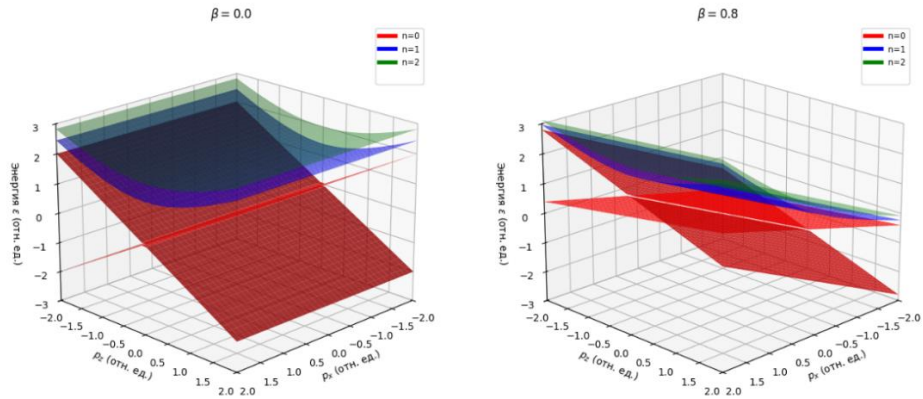


Рисунок 1 – Уровни Ландау в вейлевском полуметалле в присутствии и отсутствии электрического поля.

Получено конечное выражение для плотности состояний:

$$g_{tot} = \frac{l_x l_y l_z}{4\pi \hbar^2} \frac{eH}{c v_{\square} \gamma} + \frac{l_x l_z v_{\perp} H}{8\pi \hbar v_{\square} \gamma c E} \sqrt{\frac{eH}{\hbar c}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \left(\cos \left(\frac{\pi k c (\varepsilon - e E l_y)^2}{e \hbar H \gamma v_{\perp}} + \frac{\pi}{4} \right) - \cos \left(\frac{\pi k c \varepsilon}{e \hbar H \gamma v_{\perp}} + \frac{\pi}{4} \right) \right) \quad (5)$$

где l_x, l_y, l_z – размеры системы; γ – Лоренц-фактор; k – номер гармоники Пуассона.

Осцилляции плотности состояний представлены на рисунке 2.

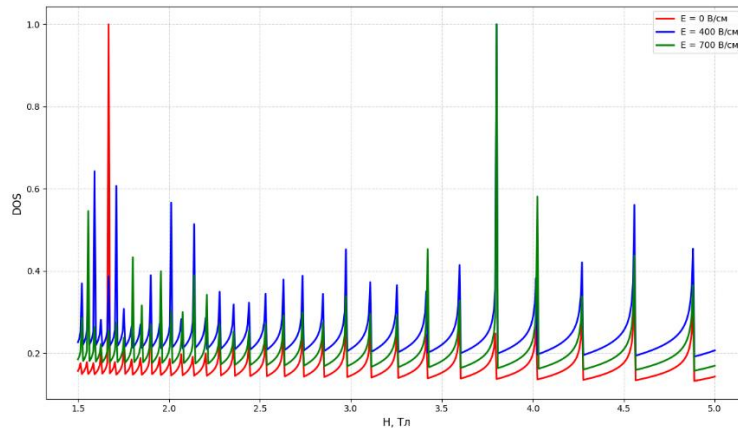


Рисунок 2 – Осцилляции плотности состояний

Получены выражения для уровней Ландау вейлевского полуметалла в присутствии электрического поля. Установлено, что с увеличением модуля напряженности электрического поля расстояние между уровнями Ландау уменьшается. Каждый энергетический уровень оказывается вырожденным с определенной кратностью, однако электрическое поле снимает вырождение. В случае, когда дрейфовая скорость равна нормальной скорости (чисто релятивистский эффект), осциллирующая часть плотности состояний равна нулю, так как происходит коллапс уровней Ландау и исчезновение орбитального движения, состояния оказываются чисто поверхностными. Это в свою очередь приводит к возникновению ферми-арок и явления киральной аномалии.

Таким образом включение в систему продольное электрическое поле дает возможность управлять магнитными свойствами топологических полуметаллов

Список использованных источников:

1. 3.3. Алисултанов (2017) Электронные свойства вейлевского полуметалла в скрещенных магнитном и электрическом полях, ЖЭТФ, 2017, Том. том 152, вып. 5 (11), стр, 986-1001.