

КВАНТОВАЯ ЕМКОСТЬ УЛЬТРАТОНКИХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

Зайцев В.А.

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

Данилюк А.Л. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Представлены результаты моделирования квантовой емкости модельного топологического изолятора в зависимости от энергии Ферми и напряженности внешнего магнитного поля до 100 кЭ. Установленные осциллирующие закономерности обусловлены квантованием уровней по Ландау и могут использоваться для интерпретации экспериментальных данных по уточнению плотности состояний топологических изоляторов.

Одним из интенсивно развивающихся направлений физики твердого тела является поиск и исследование новых материалов, демонстрирующих уникальные электронные свойства. Использование таких материалов в высокотехнологичных отраслях промышленности, электроники, спинтроники позволит создать приборы нового поколения, обладающих более высокими характеристиками по сравнению с существующими. К таким перспективным материалам относится класс узкозонных полупроводников с инвертированной запрещенной щелью, так называемые топологические изоляторы (ТИ). ТИ – это класс физических объектов, которые являются изоляторами электрического тока в объеме, однако проводят ток по границам. Проводимость осуществляется по краевым электронным состояниям в случае двумерных топологических изоляторов или по поверхностным состояниям, если речь идет о трехмерных топологических изоляторах. Появление электронных состояний на границе топологических изоляторов определяется только свойствами объема изолятора и никак не связано со структурой границы. Проводящие состояния в топологических изоляторах не могут быть устранены изменением структуры границы: они являются устойчивыми по отношению к рассеянию на дефектах, изменению формы границы и ее химической пассивации [1,2]. Такие необычные свойства поверхности ТИ дают потенциальную возможность для их использования в новых спинтронных и магнетоэлектрических приборах, а также для создания квантовых компьютеров.

Ключевым условием для реализации топологического изолятора является особая структура электронных состояний, вызванная сильным спин-орбитальным взаимодействием в материале. Топологические изоляторы демонстрируют уникальные свойства, обусловленные поверхностными состояниями дираковского типа, которые защищены симметрией обращения времени. Теория предсказывает, что поверхностные состояния демонстрируют квантовый спиновый эффект Холла. Однако до настоящего времени исследования поверхностных состояний ТИ с помощью обычных транспортных измерений остается серьезная проблема из-за влияния вклада объемных носителей заряда. Экспериментальное наблюдение осцилляций Шубникова-де Гааза в измерениях квантовой емкости дает хорошие перспективы изучения их свойств. Причем измерения квантовой емкости существенно защищены от объемных помех.

Квантовая емкость позволяет напрямую исследовать поверхностную плотность состояний, которая чувствительна к механизмам рассеивания. Таким образом, измерение квантовой емкости дает количественное описание DOS на уровне Ферми.

Величина квантовой емкости определяется в виде [3]

$$C_Q = \frac{e \partial Q}{\partial \varepsilon_F} = \frac{e^2 \partial n_e}{\partial \varepsilon_F} = e^2 D_T(H) \quad (1)$$

где n_e – концентрация носителей заряда, ε_F = энергия Ферми. Температурная зависимость DOS от магнитного поля определяется соотношением

$$D_T(H) = \frac{\partial n_e}{\partial \varepsilon_F} = \int_0^\infty d\varepsilon \frac{\partial f(\varepsilon - \varepsilon_F)}{\partial \varepsilon_F} D(\varepsilon) \quad (2)$$

где $f(\varepsilon - \varepsilon_F)$ – функция Ферми-Дирака. При низкой температуре можно допустить, что $D_T(H) = D(\varepsilon_F)$. Для гауссова уширения уровней Ландау DOS на единицу площади имеет вид [3]

$$D(\varepsilon_F) = D_0 \left[1 + 2 \sum_{\tau, k=1}^{\infty} (-1)^k \exp \left[- \left(\frac{2\sqrt{2}\pi k \varepsilon_F \Gamma}{(h/2\pi)^2 \omega^2} \right)^2 \right] \cdot \cos \left[\frac{2\pi k}{(h/2\pi)^2 \omega^2} (\varepsilon_F^2 - (\Delta_z + \tau_z \Delta_n)^2) \right] \right] \quad (3)$$

где $D_0 = |\varepsilon_F| / \pi (h/2\pi)^2 v^2$; $\omega = v \sqrt{e \mu_0 H / (h/2\pi)}$; Γ – ширина распределения Гаусса для уровней Ландау (Γ - индуцированное примесями уширение уровней Ландау), ω – циклотронная

частота дираковских фермионов, $\tau_z = \pm 1$ обозначает симметричные и антисимметричные поверхностные состояния ТИ соответственно, $\Delta_z = (1/2)g\mu_B B$, g - фактор Ланде, μ_B – магнетон Бора, Δ_h - матричный элемент гибридизации Δ_h который отражает гибридизацию между верхней и нижней поверхностями ТИ, или Δ_h - энергия гибридизации, учитывает туннелирование между двумя поверхностными состояниями ТИ, D_0 - плотность состояний в нулевом магнитном поле, v скорость Ферми для дираковских фермионов.

С помощью уравнений (1) - (3) вычислена квантовая емкость модельного ТИ в зависимости от энергии Ферми и напряженности магнитного поля. Использовались следующие значения параметров: $v = 3 \cdot 10^5$ м/с, $\Delta_z = 2-5$ мэВ, $\Gamma = 0.3$ мэВ, $\Delta_h = 2-5$ мэВ, $H = 1-100$ кЭ, $\epsilon_F = -0.05 \dots +0.05$ эВ. Полученные результаты расчета квантовой емкости C_Q в зависимости от энергии Ферми при $H = \text{const}$ приведена на рисунке 1, а в зависимости от напряженности магнитного поля при $\epsilon_F = \text{const}$ на рисунке 2.

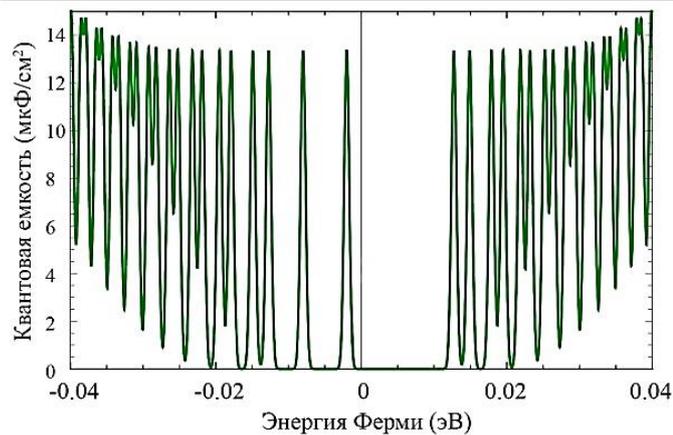


Рисунок 1 – Зависимость квантовой емкости от энергии Ферми при $H = 30$ кЭ, $\Delta_z = 5$ мэВ, $\Delta_h = 4$ мэВ.

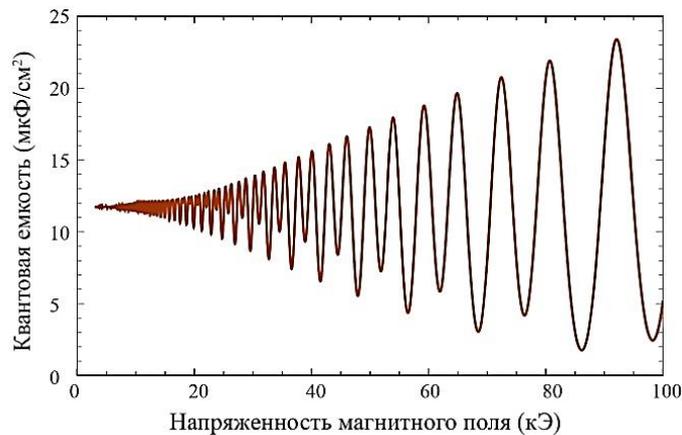


Рисунок 2 – Зависимость квантовой емкости от напряженности магнитного поля при $\Gamma = 0.3$ мэВ, $\epsilon_F = 0.03$ эВ, $\Delta_h = 4$ мэВ, $n_e = 4 \cdot 10^{15}$ м⁻², $v = 3 \cdot 10^5$ м/с.

Полученные закономерности квантовой емкости соответствуют колебаниям плотности состояний ТИ в магнитном поле из-за квантования уровней Ландау. Как можно видеть из рис.1 амплитуда колебаний квантовой емкости и соответственно плотности состояний уменьшается с ростом энергии Ферми при постоянной напряженности магнитного поля, в тоже время эта амплитуда нарастает с увеличением напряженности магнитного поля, рис.2. Это соответствует экспериментальным данным по измерению осцилляций Шубникова-де Гааза. Полученные результаты моделирования могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных по измерению квантовой емкости и уточнению деталей плотности состояний топологических изоляторов.

Список использованных источников:

1. M. Z. Hasan and C. L. Kane. Colloquium: Topological insulators/ Rev. Mod. Phys. 2010. Vol. 82, Iss.4. P.3045.
2. Xiao-Liang Qi and Shou-Cheng Zhang. Topological insulators and superconductors// Rev. Mod. Phys. 2011. Vol. 83, Iss.4. P.1057.
3. M. Tahir, K. Sabeeh, U. Schwingenschlög. Quantum capacitance of an ultrathin topological insulator film in a magnetic field// Scientific Reports. 2013. Vol 3 Article number 1261