

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Ключко Е.С., Чеботарёва А.В., студенты

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

Малевич В. Л. – д-р физ.-мат. наук, профессор

Аннотация. Рассматривается история открытия топологических изоляторов – нового класса конденсированных материалов, которые в объеме являются диэлектриком, а по поверхности проводят электрический ток. Излагается роль топологического порядка в формировании поверхностных электронных состояний с дираковским спектром. Обсуждаются возможные практические применения топологических изоляторов.

Топологические изоляторы представляют собой новый класс материалов, сочетающих свойства объемного диэлектрика и поверхностного проводника.

История открытия таких материалов берёт своё начало в 1980-м году, когда немецкий физик Клаус фон Клитцинг познакомил мир с квантовым эффектом Холла. Следующий прорыв случился в 2005-2006 годах, когда Чарльз Кейн и Юджин Меле предсказали существование таких материалов, где роль внешнего поля играет само внутреннее устройство атомов (спин-орбитальное взаимодействие). Уже в 2007 году группа Лоуренса Моленкампа экспериментально подтвердила эффект топологического изолятора в сверхтонких пленках теллурида ртути с квантовыми ямами.

В отличие от классического эффекта Холла, где холловское сопротивление (R_{xy}) меняется линейно от магнитного поля, квантовый эффект Холла проявляется в виде образования «плато» (ступенек) на графике зависимости сопротивления от магнитного поля. Значения сопротивления на этих плато принимают строго квантованные значения и определяются формулой:

$$R_{xy} = \frac{V_{\text{Холл}}}{I_k} = \frac{h}{e^2\nu}, \quad (1)$$

где R_{xy} – холловское сопротивление, $V_{\text{Холл}}$ – напряжение Холла, I_k – ток канала, e – элементарный заряд, h – постоянная Планка ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж*с), ν – коэффициент заполнения.

В топологических изоляторах энергетические зоны «перекручены» особым образом. В качестве примера можно представить себе ленту Мёбиуса. Как бы вы её не крутили, её топологические свойства не изменяются, пока вы её не разрежете. Уникальные свойства топологических изоляторов обусловлены существованием топологически защищённых делокализованных поверхностных состояний с дираковским электронным спектром. Эти состояния не могут быть локализованы под действием слабого беспорядка или в результате рассеяния на дефектах. Их спин жёстко связан с направлением движения. Если электрон идёт «вперёд», его спин смотрит «вверх». Чтобы развернуться назад, ему нужно перевернуть спин, что запрещено законом сохранения, пока нет магнитной примеси. Это означает, что ток течёт практически без потерь на нагрев.

Топологические изоляторы могут использоваться в различных областях науки и техники, например в спинтронике. Спинтроника – это раздел квантовой электроники, использующий для обработки информации не только заряд, но и спин электрона. Передача информации спином электрона позволяет существенно уменьшить тепловыделение и создать процессоры в десятки раз быстрее существующих.

Топологические изоляторы являются платформой для создания «майорановых фермионов». Это частицы, которые могут служить идеальными кубитами, устойчивыми к внешним шумам (декогеренции).

Будущее топологических изоляторов связано с переходом от фундаментальных исследований к созданию принципиально новых устройств для применений в микро- и оптоэлектронике, фотонике, а также при создании квантовых компьютеров.

Список использованных источников:

1. Клитцинг, К. фон. Квантовый эффект Холла: (Нобелевская лекция) // Успехи физических наук. — 1986. — Т. 150, вып. 1. — С. 33–107.
2. Kane, C. L. Quantum Spin Hall Effect in Graphene / C. L. Kane, E. J. Mele // Physical Review Letters. — 2005. — Vol. 95, № 22. — Art. 226801.
3. Елисеев, А. А. Топологические изоляторы: терминология, классификация, свойства и методы получения / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин // Успехи химии. — 2014. — Т. 83, № 12. — С. 1162–1182.