

Квантовый эффект Холла в наноструктурах на основе фторида кадмия

© Н.Т. Баграев[†], О.Н. Гимбицкая, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко,
И.А. Шелых, А.И. Рыскин*, А.С. Щеулин*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Государственное образовательное учреждение профессионального образования
„Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики“,
197101 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 8 июля 2008 г. Принята к печати 10 июля 2008 г.)

Обнаружены осцилляции Шубникова–де-Гааза и квантовая лестница холловского сопротивления в квантовой яме p -CdF₂, ограниченной δ -барьерами CdB_xF_{2-x}, на поверхности n -CdF₂. Благодаря низкой эффективной массе двумерных дырок наблюдение квантового эффекта Холла стало возможным при комнатной температуре.

PACS: 73.50-h, 7323.Ad

Квантовый эффект Холла (КЭХ) представляет собой квантовое явление, которое проявляется на макроскопическом уровне и привлекает сильный интерес с момента его открытия в 1980 году [1]. КЭХ, свойственный исключительно двумерным (2D) металлам, объяснил много важных аспектов квантовой физики и значительно углубил понимание процессов внутри взаимодействующих систем. Он также привел к введению нового метрологического стандарта, кванта сопротивления, h/e^2 , который содержит только фундаментальные константы заряда электрона e и постоянной Планка h [2]. Как и в случае со многими другими квантовыми явлениями, наблюдение КЭХ, как правило, требует использования сверхнизких температур и сверхсильных магнитных полей [1,2]. Практически все попытки регистрации КЭХ при высоких температурах путем использования полупроводников с малыми эффективными массами носителей заряда не принесли существенных результатов [3,4]. Эти усилия были вызваны как естественным желанием прямо наблюдать квантовые явления в обычных условиях, так и практической необходимостью проводить измерения при комнатной температуре или по крайней мере при температуре жидкого азота. Если бы удалось создать условия для устойчивости квантовых состояний при высоких температурах, то это обеспечило бы дополнительные возможности для исследования более тонких особенностей КЭХ. Недавно было показано, что в графене, представляющем собой одинарный слой атомов углерода, плотно упакованных в кристаллической решетке в виде медовых сот, КЭХ можно наблюдать даже при комнатной температуре. Это происходит благодаря весьма необычной природе носителей заряда, которые ведут себя в графене как релятивистские частицы, не обладающие массой (фермионы Дирака), и движутся с малым рассеянием при обычных условиях [5,6]. В настоящей работе мы показываем, что КЭХ при комнатной температуре можно также наблюдать в сверхузкой

квантовой яме p -типа на поверхности кристалла n -CdF₂. Это стало возможным благодаря малой эффективной массе двумерных дырок вследствие наличия δ -барьеров CdB_xF_{2-x}, ограничивающих квантовую яму [7].

На рис. 1 показана структура, использованная в измерениях КЭХ. Технология получения данной структуры, в основе которой сверхузкая квантовая яма p -CdF₂, ограниченная δ -барьером CdB_xF_{2-x} на поверхности кристалла n -CdF₂, описана в [7]. При комнатной температуре, $T = 298$ К, ее холловское сопротивление, R_{xy} , проявляет последовательность плато при $h/2ve^2$ для двумерных дырок (где v — номер уровня Ландау), тогда как продольное сопротивление, ρ_{xx} , приближается к нулю (< 10 Ом), демонстрируя осцилляции Шубникова–де-Гааза (рис. 2). Наблюдение КЭХ при комнатной температуре, по-видимому, стало возможным благодаря большому энергетическому зазору между уровнями Ландау, $\hbar\omega_c$, вследствие крайне малой эффективной массы двумерных дырок в квантовой яме

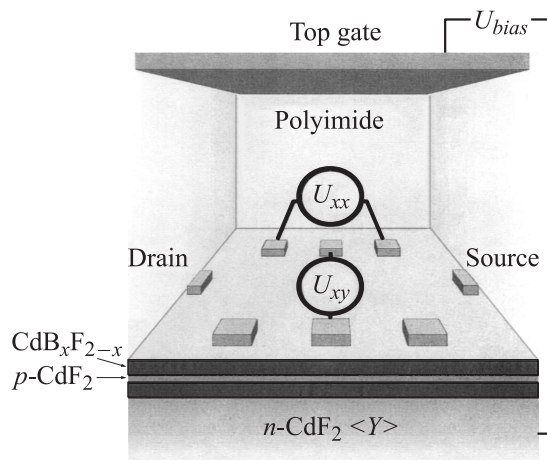


Рис. 1. Геометрия холловских измерений квазидвумерного газа дырок в плоскости квантовой ямы p -CdF₂, ограниченной δ -барьерами CdB_xF_{2-x} на поверхности кристалла n -CdF₂.

[†] E-mail: Bagraev@mail.ioffe.ru

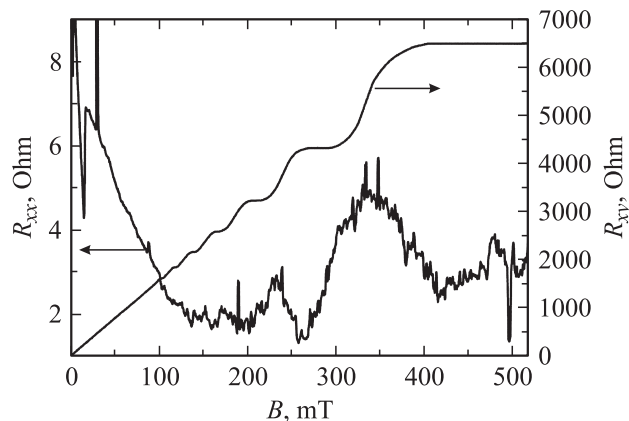


Рис. 2. Осцилляции Шубникова–де-Гааза и холловская лестница сопротивления в квантовой яме $p\text{-CdF}_2$, ограниченной δ -барьерами $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ на поверхности кристалла $n\text{-CdF}_2$. $T = 298\text{ K}$.

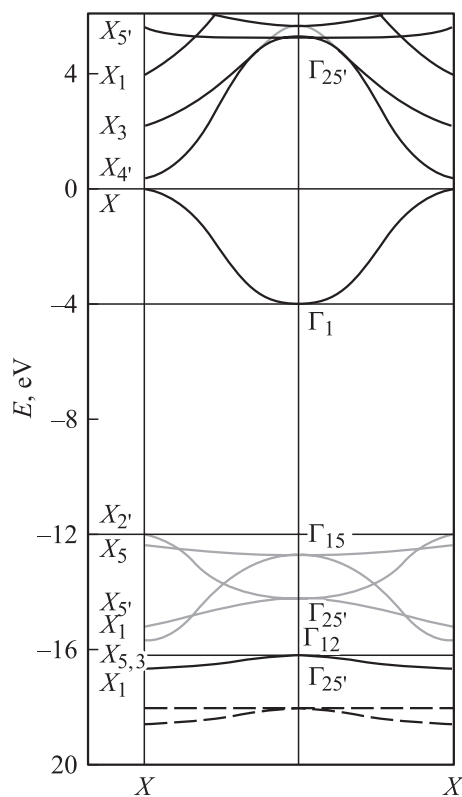


Рис. 3. Зонная схема кристалла CdF_2 .

$p\text{-CdF}_2$, определенной из значения периода осцилляций проводимости Ааронова–Кашера в сэндвич-структуре $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}-p\text{-CdF}_2-\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ на поверхности кристалла $n\text{-CdF}_2$, измеренного при комнатной температуре, $m_{\text{eff}} = 3.44 \cdot 10^{-4} m_0$ [7]. Это означает, что при комнатной температуре $\hbar\omega_c$ сравнима с тепловой энергией, $k_B T$, при 100 mT . Поэтому квантовые ямы на основе CdF_2 допускают для плотности двумерных дырок вплоть до 10^{14} м^{-2} заполнение единственной двумерной

подзоны, что существенно для наблюдения лестницы холловского сопротивления в относительно слабом магнитном поле в отличие от традиционных полупроводниковых двумерных систем. Следует отметить, что подвижность, μ , в наших образцах не менялась существенно в интервале температур от жидкого азота до комнатной. Она остается на уровне $\approx 1500\text{ м}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, вследствие чего значение транспортного времени $\tau \approx 2.3 \cdot 10^{-12}\text{ с}$, и приближение сильного поля $\omega_c \tau = \mu \cdot B \gg 1$ достигается в полях порядка нескольких десятков mT .

Одной из причин образования двумерных дырок с крайне малой эффективной массой в „сэндвич-структуре $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}-p\text{-CdF}_2-\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ “, что и послужило основой для регистрации КЭХ при комнатной температуре, по-видимому, является формирование квантово-размерного p^+-n -перехода. В этом случае широкая запрещенная зона CdF_2 , 7.8 эВ , практически исчезает, что приводит к инверсии дырочных и электронных состояний вблизи области p^+-n -перехода (рис. 3 и 4). Дополнительным фактором, способствующим стабилизации данной инверсии состояний, по-видимому, является пиннинг уровня Ферми, обусловленный образованием энергетической щели вблизи валентной зоны δ -барьеров $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ (рис. 4) [7]. Возможны и другие версии формирования двумерных дырок с крайне малой эффективной массой вследствие их взаимодействия с дипольными центрами бора в δ -барьерах [7], которые нуждаются в дальнейших исследованиях.

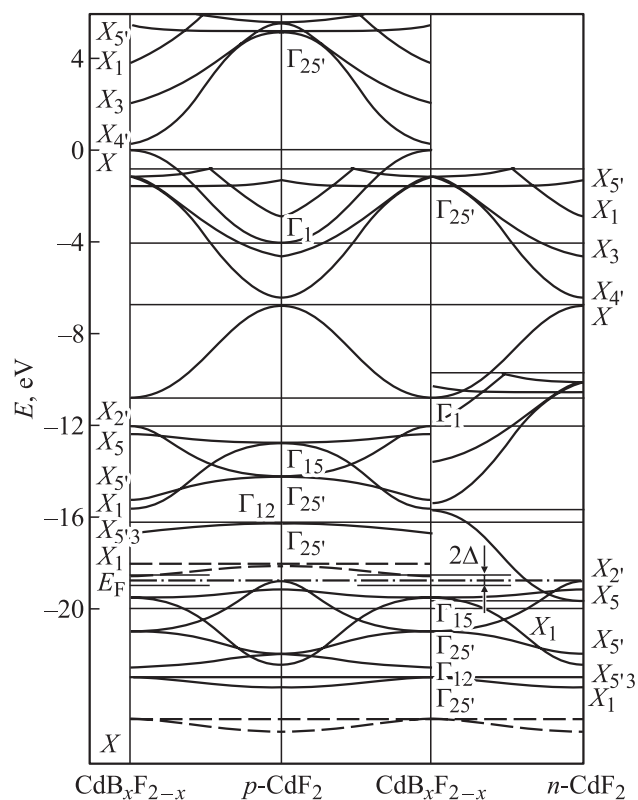


Рис. 4. Зонная схема сэндвич-структуры $\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}-p\text{-CdF}_2-\text{CdB}_x\text{F}_{2-x}$ в условиях формирования квантово-размерного p^+-n -перехода с $n\text{-CdF}_2$.

Таким образом, впервые наблюдались осцилляции Шубникова–де-Гааза и квантовая лестница холловского сопротивления в квантовой яме p -CdF₂, ограниченной δ -барьерами CdV_xF_{2-x}, на поверхности n -CdF₂. Благодаря низкой эффективной массе двумерных дырок наблюдение квантового эффекта Холла стало возможным при комнатной температуре.

Данная работа поддержана в рамках фундаментальных исследований президиума РАН П-03 „Квантовая макрофизика“ (проект 4.1), программ фундаментальных исследований президиума РАН „Квантовые наноструктуры“ (проект 4-2. 9А-19), программ швейцарского национального научного фонда (SNSF) (grant IB7320-110970/1), федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы“, контракт № 02.514.11.4074.

Список литературы

- [1] K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper. *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 494 (1980).
- [2] S. Das Sarma, A. Pinczuk. *Perspectives in Quantum Hall Effects* (Wiley, N.Y., 1997).
- [3] S.Q. Murphy, J.L. Hicks, W.K. Liu, S.J. Chung, K.J. Goldammer, M.B. Santos. *Physica E*, **6**, 293 (2000).
- [4] G. Landwehr, J. Gerschütz, S. Oehling, A. Pfeuffer-Jeschke, V. Latussek, C.R. Becker. *Physica E*, **6**, 713 (2000).
- [5] A.K. Geim, K.S. Novoselov. *Nature Mater.*, **6**, 183 (2007).
- [6] Y. Zhang, Y.W. Tan, H.L. Stormer, P. Kim. *Nature*, **438**, 201 (2005).
- [7] Н.Т. Баграев, О.Н. Гимбицкая, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, И.А. Шельх, А.И. Рыскин, А.С. Щеулин. *ФТП*, **43**, 85 (2009).

Редактор Л.В. Беляков

Quantum Hall Effect in CdF₂ Nanostructures

N.T. Bagraev, O.N. Guimbitskaya, L.E. Klyachkin, A.M. Malyrenko, I.A. Shelykh, A.I. Ryskin, A.S. Shcheulin**

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* St. Petersburg University of Information Technologies,
Mechanics and Optics,
197101 St. Petersburg, Russia

Abstract The Shubnikov–de-Haas oscillations and the quantum staircase of Hall resistance are found in the p -type CdF₂ confined by the δ -CdV_xF_{2-x} barriers prepared on the n -CdF₂. Owing to the ultra-low effective mass of 2D holes the quantum Hall observation became to be possible at room temperatures.