

О ПРОТЕКАНИИ ТОКА МЕЖДУ ПРИЛЕГАЮЩИМИ ИНВЕРСИОННЫМИ СЛОЯМИ В КВАНТУЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*А.Б.Беркут, Ю.В.Дубровский, М.С.Нунупаров,
М.И.Резников, В.И.Тальянский*

Впервые исследовался квантовый эффект Холла (КЭХ) в специальной кремниевой МДП-структуре с двумя полевыми электродами, разделенными диэлектрической пленкой ~ 500 Å. Сформулировано правило, описывающее протекание тока через границу между двумя идеальными холловскими проводниками и позволяющее рассчитывать произвольное соединение таких проводников.

Исследовалось протекание тока через границу между двумя электронными слоями на поверхности кремния в квантующем магнитном поле. На такой границе существует потенциальный рельеф, "высота" которого зависит от разности концентраций электронов в слоях. В сильном магнитном поле электроны движутся по эквипотенциалам, поэтому потенциальный рельеф должен препятствовать перетеканию электронов из слоя в слой. Если (как в нашем случае) переход между слоями достаточно резкий (т.е. изменение потенциала на магнитной длине сравнимо с $\hbar\omega_c$), то приграничная область может вообще не описываться локальным тензором электропроводности. Теории, описывающей протекание тока в такой ситуации до настоящего времени не существует.

Измерения проводили на специальной кремниевой МДП-структуре с двумя полевыми электродами (затворами), разделенными диэлектрической пленкой (SiO_2) толщиной 500 Å. Толщины подзатворных диэлектриков (SiO_2) составляли 740 и 520 Å. С помощью затворов можно было независимо создавать два инверсионных канала (отстоящих друг от друга на ~ 500 Å) с желаемыми концентрациями электронов. На рис. 1 (вставка) показана топология МДП-структуры. Она позволяла исследовать как свойства каждого 2D канала в отдельности, так и протекание тока из канала в канал. На рис. 1 показаны результаты измерений компонент тензора магнитосопротивления ρ_{xx}, ρ_{xy} для каждого из слоев. Подвижность электронов в слоях составляла $\sim 3 \cdot 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Не очень высокое значение подвижности связано со сложностью технологического процесса, необходимого для изготовления двухзатворных МДП-структур. При исследовании протекания тока через границу между каналами фиксировалось напряжение на втором затворе так, чтобы в соответствующем канале было заполнено целое число уровней Ландау, а напряжение на первом затворе изменялось. Ток пропускался через контакты 1, 1' (рис. 1, вставка) и измерялось напряжение на контактах 2, 2'

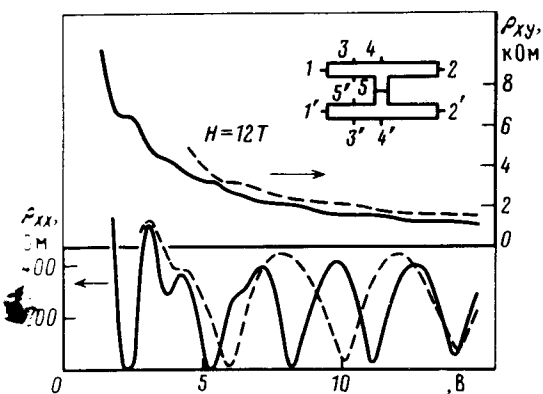


Рис. 1.

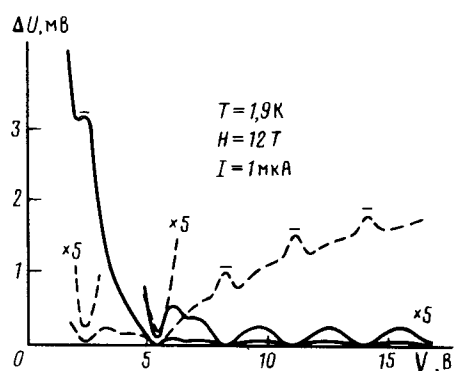


Рис. 2.

Рис. 1. Зависимости компонент тензора магнитосопротивления ρ_{xy} и ρ_{xx} от напряжения на затворе. Сплошные кривые — для первого канала (ток 1 мкА пропусклся через контакты 1, 2), пунктирные — для второго канала (токовые контакты — 1', 2') $T = 1,9 \text{ К}$

Рис. 2. Зависимости напряжений $\Delta U_{2,2'}$ и $\Delta U_{1,1'}$ (см. текст) от напряжения на первом затворе. Сплошная кривая — $\Delta U_{2,2'}$, пунктирная — $\Delta U_{1,1'}$. Символом $\times 5$ помечены увеличенные в 5 раз фрагменты соответствующих кривых

($\Delta U_{2,2'}$), которые в данном случае находились на правой (по отношению к току) стороне каналов. Зависимость $\Delta U_{2,2'}$ от напряжения на первом затворе (V) показана на рис. 2 (сплошная кривая). Затем контакты 2, 2' использовались как токовые (при этом направление и величина тока между каналами оставались прежними), а контакты 1, 1' — как потенциальные (рис. 2, пунктирная линия — $\Delta U_{1,1'}$). Теперь потенциальные контакты находились на левой по отношению к току стороне каналов. При изменении направления магнитного поля, кривые на рис. 2 менялись местами. Рассмотрим те значения напряжения на первом затворе, которые соответствуют режиму КЭХ. Видно, что когда оба канала находятся в условиях КЭХ и при этом холловское сопротивление первого канала R_1 больше холловского сопротивления второго канала R_2 ($V = 2,4 \text{ В}$, рис. 2), то $\Delta U_{2,2'} \approx I(R_1 - R_2)$; $\Delta U_{1,1'} \approx 0$ (значения $\Delta U = I |R_2 - R_1|$ отмечены черточками). По мере увеличения напряжения на первом затворе R_1 уменьшается (R_2 — фиксировано) и когда первый канал вновь оказывается в условиях КЭХ, то $\Delta U_{2,2'} \approx 0$, а $\Delta U_{1,1'} \approx I(R_2 - R_1)$, где теперь $R_2 > R_1$. При $R_1 = R_2$ ($V \approx$

$\approx 5,3$ В), как и следовало ожидать, $\Delta U_{1,1'} = \Delta U_{2,2'} = 0$. Точность, с которой выполняются указанные выше соотношения, тем выше, чем меньше ρ_{xx} , и, следовательно, чем ближе слои к идеальным холловским проводникам (ИХП). Резюмируем полученные результаты. При последовательном соединении двух ИХП, потенциал на одной стороне каналов не изменяется при переходе через границу между каналами, а на другой стороне — испытывает скачок, равный разности холловских напряжений каналов. Сторону, где потенциал испытывает скачок, можно определить с помощью следующего правила. Введем вспомогательный вектор $\vec{\mu}$, лежащий в плоскости ИХП и направленный перпендикулярно границе между ними в область с большим холловским сопротивлением. Тогда вектор $[\vec{\mu} \mathbf{H}]$ (направленный вдоль границы раздела) укажет сторону каналов, где потенциал испытывает скачок. Следует отметить, что к настоящему времени опубликовано несколько работ, в которых обсуждаются сходные вопросы ¹⁻³. В работах Стайлза и др. изучали протекание тока между металлическим электродом и 2D-каналом ¹ и между двумя 2D-каналами ², причем в ² сделаны такие же выводы, как и в настоящей работе. В ² использовалась МДП-структура с одним полевым электродом и подзатворным диэлектриком, состоящим из двух областей различной толщины. Такая структура существенно менее удобна для изучения взаимодействия ИХП, чем двухзатворная, так как не позволяет независимо изменять концентрации носителей 2D-каналов. Однако авторам ² удалось подобрать напряжение на затворе и магнитное поле так, чтобы оба слоя попали в режим КЭХ. Используемая нами МДП-структура позволила продемонстрировать справедливость сделанных выводов более убедительно. В работе ³ изучалось протекание тока через границу между двумя металлическими пленками различной толщины и обнаружено различное падение напряжения на разных сторонах пленки при переходе через границу раздела между пленками.

Полученное нами правило (совместно с правилом, описывающим протекание тока между металлическим контактом и ИХП ¹) позволяет рассчитывать произвольное соединение ИХП. В частности, можно показать, что при последовательном соединении двух ИХП общее сопротивление равно большему из холловских сопротивлений, а при параллельном соединении — меньшему из них.

Авторы благодарны В.Ф.Гантмахеру за предоставленную возможность провести измерения на установке с магнитным полем до 12 Т, В.А.Гражулису за внимание и интерес к работе и А.К.Гейму, указавшему на работу ³.

Литература

1. Fang F.F., Stiles P.J. Phys. Rev., 1984, B29, 3749.
2. Syphers D.A., Stiles P.J. Phys. Rev., 1985, B32, 6620.
3. Bruls G.J.C.L., Bass J., van Gelder A.P., van Kempen H., Wyder P. Phys. Rev., Lett., 1981, 46, 553.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Институт проблем технологии микроэлектроники
и особо чистых материалов
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
19 июля 1986 г.