

ЭКРАНИРОВКА ШЕРОХОВАТОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

И.Ф.Свекло, В.С.Цой*

**Отдел проблем ресурсосбережения АН Беларуси,
230023 Гродно, Беларусь.*

*Институт физики твердого тела РАН,
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 22 ноября 1992 г.

Создана методика для прямого наблюдения эффекта поля на вероятность зеркального отражения электронов. Наблюдалась экранировка шероховатостей поверхности висмута внешним электрическим полем при отражении от нее электронов.

В полуметаллах и полупроводниках при отражении носителей тока от поверхности образца эффективным путем подавления диффузности отражения может оказаться экранировка шероховатостей полем поверхностного заряда (приповерхностный изгиб зон) ¹. Именно с этим обстоятельством связано радикальное различие в вероятностях зеркального отражения электронов $q_e = 0,8$ и дырок $q_h = 0,2$ при отражении от одного и того же участка поверхности образца сурьмы, обнаруженное в ² с помощью поперечной электронной фокусировки (ЭФ) ³. Особый интерес представляет решение проблемы управляемого изменения характера отражения путем искусственного изгиба зон.

При отражении от поверхности электрон претерпевает либо внутривалинное, либо межвалинное рассеяние. Именно межвалинное рассеяние является основной причиной подавления внутривалинного зеркального отражения ⁴. Эффективность межвалинного рассеяния в висмуте определяется шероховатостями атомного масштаба. Поскольку в висмуте дебаевский радиус экранировки $r_D \sim 200 \text{ \AA}$, много больше межатомного расстояния, то экранировка шероховатостей атомного масштаба полем поверхностного заряда должна практически исключить межвалинное рассеяние, тем самым значительно увеличить вероятность внутривалинного зеркального отражения.

В данной работе отражение электронов от поверхности изучалось с помощью ЭФ. Использовали обычную схему измерений ³: на поверхности монокристаллического образца висмута с нормалью к поверхности образца $n \parallel C_3$ устанавливали два точечных контакта – эмиттер и коллектор; через эмиттер образец "впрыскивались" неравновесные электроны – через контакт пропускаться электрический ток; измерялось напряжение на коллекторе U_k в зависимости от величины магнитного поля H , лежащего в плоскости поверхности образца и направленного перпендикулярно линии контактов, проходящей через эмиттер и коллектор, таким образом, что электроны, вылетевшие из эмиттера могли фокусироваться на коллекторе. Линия контактов была параллельна C_2 .

Наблюдение влияния электрического поля на вероятность зеркального отражения электронов проводили на образцах, поверхность которых была предварительно протравлена ионами Ag^+ . Ионное травление поверхности Ag^+ проводилось в установке ВУП-4; рабочие параметры: ускоряющее напряжение $\simeq 600 \text{ эВ}$, давление аргона в камере $\simeq 10^{-3}$ торр, время травления $\simeq 1$ мин.

При ионном травлении на поверхности разрушается атомный порядок, создаются дефекты атомного масштаба, что, в частности, радикально уменьшает вероятность зеркального отражения для электронов^{5,6}.

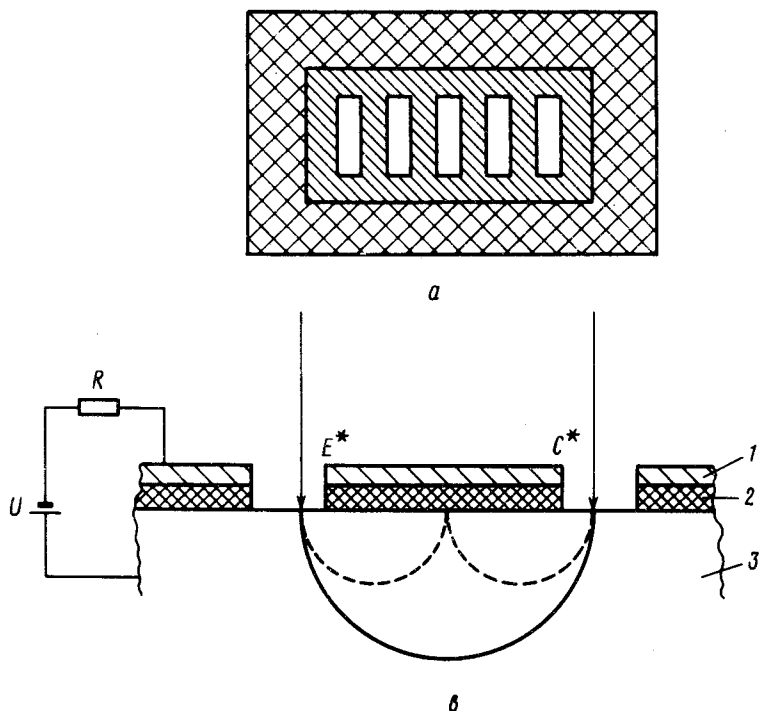


Рис.1. Схема эксперимента для наблюдения влияния внешнего электрического поля на характер отражения электронов проводимости от поверхности образца. Пленка напыленного алюминия выделена штриховкой, пленка диэлектрика выделена двойной штриховкой. Для ясности части рисунка *a* и *б* выполнены в различном масштабе. *a* – Вид сверху на поверхность образца. *б* – Приготовленный конденсатор в разрезе: E^* – эмиттер, C^* – коллектор, 1 – пленка алюминия, 2 – пленка диэлектрика, 3 – образец, U – источник напряжения, R – балластное сопротивление. Показаны две траектории электронов, формирующих линию ЭФ без отражения от поверхности и после однократного отражения от поверхности (пунктир)

Для создания внешнего электрического поля, нормального к поверхности образца изготавливали электрический конденсатор (рис.1*a,б*) – одной обкладкой конденсатора был сам образец, другой – напыленная на диэлектрическую прокладку пленка алюминия. На поверхность образца 3 наносился точечный слой диэлектрика 2, затем с помощью фотолитографии в диэлектрике делался ряд прямоугольных отверстий размером 100×1000 мкм, после этого через маску, закрывающую отверстия, напылялась тонкая пленка алюминия 1. Несмотря на маску между пленкой и образцом возникал электрический контакт, для устранения которого на пленку относительно образца подавалось постоянное напряжение ~ 10 В, в местах электрического контакта пленки с образцом проходил достаточно большой ток и по границе отверстий в диэлектрике пленка алюминия "выгорала", электрический контакт пленки с образцом пропал. Потенциальный контакт к пленке алюминия приклеивался проводящим клеем, стабильность контакта контролировалась измерением емкости пленка-

образец. Характерная величина емкости ~ 200 пФ. В качестве диэлектрика использовали окись кремния SiO либо фоторезист ФП-383. SiO наносилась на поверхность образца термическим напылением в вакууме. Характерная толщина пленки была $\sim 5000 \text{ \AA}$. Фоторезист наносился с помощью центрифуги и толщина его составляла ≈ 1 мкм. Толщину диэлектрика определяли как по величине емкости конденсатора, так и с помощью интерференционного микроскопа МИИ-7.

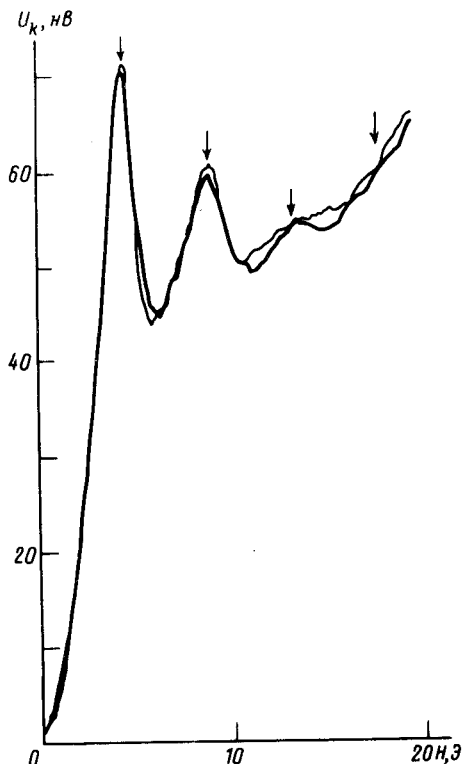


Рис.2. Зависимости $U_k(H)$, снятые при нулевом напряжении на конденсаторе (тонкая линия) и при напряжении -30 В (жирная линия)

Контакты - коллектор и эмиттер, устанавливали на образце в соседних отверстиях в диэлектрике (рис.1б). В эксперименте измерялась зависимость $U_k(H)$ в отсутствие электрического поля в конденсаторе и при его наличии. Величина электрического поля была близка к пробойному значению для данного диэлектрика. При использовании в качестве диэлектрика SiO изменений в $U_k(H)$ при приложении электрического поля не наблюдалось. Следует отметить, что после напыления пленки SiO вероятность зеркального отражения электронов увеличивалась на $0,1 \div 0,15$ по сравнению с контрольным участком поверхности образца. При использовании в качестве диэлектрика фоторезиста ФП-383 удалось наблюдать заметные изменения в $U_k(H)$ при приложении внешнего электрического поля. На рис.2 показаны экспериментальные зависимости $U_k(H)$: тонкая линия - при нулевом напряжении на конденсаторе, жирная линия - при напряжении -30 В, что соответствует электрическому полю у поверхности $\sim 6 \cdot 10^5$ В/см. Приложение напряжения другой полярно-

сти на вид $U_k(H)$ не влияло. Наиболее существенное изменение в $U_k(H)$ – возникновение третьей линии ЭФ после приложения напряжения, в отсутствие которого эта линия не разрешается. В то же время приложение напряжения практически не повлияло на амплитуду второй линии.

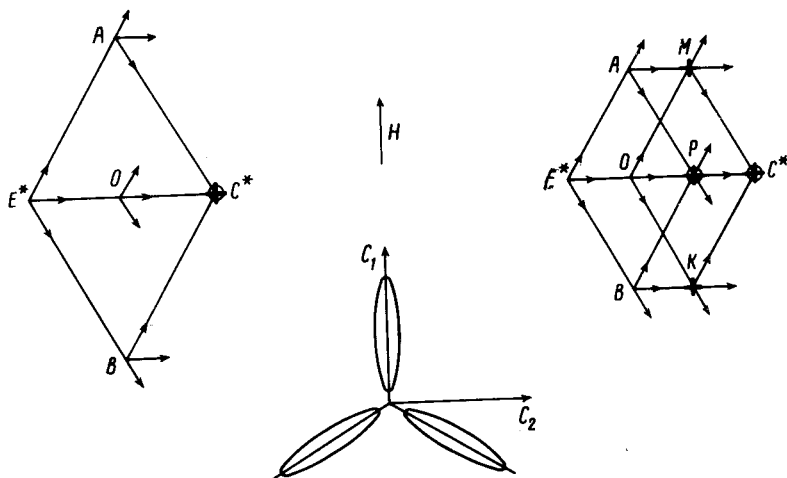


Рис.3. Проекция на плоскость образца электронных долин (эллипсоидов) висмута и траекторий электронов, формирующих вторую линию ЭФ (левая часть рисунка) и третью линию ЭФ (правая часть рисунка). C_1 и C_2 – кристаллографические оси, H – магнитное поле, E^* – эмиттер, C^* – коллектор

Электронная часть ферми-поверхности висмута представляет собой три сильно вытянутых эллипсоида, переходящих друг в друга при повороте вокруг C_3 на 120° (рис.3). Форма поверхности эллипсоидов близка к цилиндрической, вследствие чего практически все электроны, вылетевшие из эмиттера, движутся в плоскостях, перпендикулярных большому полуосям эллипсоидов. При $H \parallel C_1$ ларморовский радиус электронов, движущихся вдоль либо параллельно E^*C^* , в два раза меньше, чем ларморовский радиус электронов, движущихся под углом 60° к этому направлению (рис.3). Проекция электронных траекторий на плоскость образца на рис.3 показаны прямыми линиями. В точках А, О, В, М, Р, К, C^* происходит фокусировка электронов и их отражение от поверхности. Возможные направления движения после отражения указаны стрелками. При междолинном рассеянии на поверхности электрон изменяет плоскость движения, вследствие чего возникает возможность попадания на коллектор электронов всех трех долин ⁷ и амплитуда линии ЭФ в используемой геометрии эксперимента определяется как внутривалинным, так и междолинным рассеянием. Кружками и крестами обозначены точки, в которые электрон приходит после соответственно меж- и внутривалинного отражения. В точки без этих значков электроны фокусируются без отражений от поверхности. Амплитуда линии ЭФ определяется суммой возможных различных траекторий, двигаясь вдоль которых электрон вылетевший из эмиттера достигает коллектора, например вдоль E^*AMC^* , с учетом типа поверхностного рассеяния. Исследованию характера междолинного рассеяния в рассматриваемой геометрии посвящены работы ^{8,4}. При однодолинном электронном спектре при изменении Δq изменение амплитуды n -линии $\Delta A_n \simeq A_1(n-1)q^{n-2}\Delta q$,

то есть с увеличением n изменение A_n уменьшается, так как $q < 1$. При многодолинном спектре: $A_2 = A_1 q_e + A_1 2\beta q_{em}$, $A_3 = A_1 q_e^2 + A_1 6\beta^2 q_{em}^2$, где β – коэффициент, определяемый геометрией эксперимента, включая размеры контактов, структурой ферми-поверхности, характером междолинного рассеяния – хаотическое или скоррелированное, q_{em} – вероятность междолинного электрон-электронного рассеяния. Вследствие малой вероятности междолинного электрон-дырочного рассеяния⁹ оно не учитывается. Так как $q_e + 2q_{em} = 1$ ($\Delta q_e = -2\Delta q_{em}$), то уменьшение q_e влечет за собой увеличение q_{em} и наоборот. При малом Δq и равновероятном рассеянии во все электронные долины: $\Delta A_2 = A_1 \Delta q_e (1 - \beta)$, $\Delta A_3 = A_1 \cdot 2q_e \Delta q_e (1 - 3\beta^2)$. Напомним, что ЭФ в кратных полях должна наблюдаться и при диффузном отражении⁷, так как плотность вероятности попасть электрону в зеркальное состояние не равна нулю. В висмуте же при исходном полностью диффузном отражении, включающем равновероятность отражения во все электронные долины, $\beta = 1$ и изменений в A_2 не должно происходить даже при полном подавлении междолинного рассеяния. Это объясняется следующим образом (см. рис.3). При формировании второй линии ЭФ (левая часть рис.3) электроны, вылетевшие из эмиттера и движущиеся в направлении к коллектору, сначала фокусируются в точке O , после чего вследствие междолинного рассеяния этот поток разделяется на три равных, движущихся вдоль направлений, указанных стрелками, и вклад в амплитуду второй линии дает лишь 1/3 числа электронов, сфокусированных в точке O . Однако по 1/3 потока дадут две другие долины, электроны которых вылетев из эмиттера фокусируются соответственно в точках A и B и после междолинного рассеяния фокусируются на коллекторе. Если исключить междолинное рассеяние, линия ЭФ будет формироваться лишь электронами одной долины и весь поток после отражения в точке O будет двигаться к коллектору и даст вклад в амплитуду линии. Таким образом, при исключении междолинного рассеяния изменений в потоке, формирующем вторую линию ЭФ, не происходит. Аналогичные рассуждения показывают, что в то же время изменение в амплитуде третьей линии (см. правую часть рис.3) должно происходить и более того оно должно быть обратного знака в сравнении со случаем однодолинного электронного спектра.

Ранее проведенные исследования отражения электронов от поверхности висмута⁴ показали, что в случае ионно-протравленной поверхности имеет место полностью диффузное отражение электронов. Предварительные исследования показали, что поверхность образцов изначально заряжена. Величина заряда столь значительна, что обуславливает различие в характере отражения электронов и дырок. Проявление эффекта поля в этих условиях рассмотрено выше и должно выражаться в следующем: 1) эффект зависит от полярности поля; 2) поле не влияет на амплитуду второй линии ЭФ; 3) обусловленное эффектом поля уменьшение вероятности внутридолинного отражения приводит к увеличению амплитуды третьей линии ЭФ и наоборот. Именно такое поведение и наблюдается в эксперименте. Невысокая вероятность зеркального отражения не позволяет наблюдать изменений в амплитудах линий с более высокими номерами. При неэквивалентности долин, обусловленной различием долин либо, возможно, ориентацией нормали к поверхности относительно кристаллографических осей образца, величина эффекта поля, включая знак, определяется величиной β .

Из полученных экспериментальных данных оценка величины изменения

вероятности зеркального отражения при приложении электрического поля дает величину $\Delta q_e \simeq -2\Delta q_{em} \sim 0, 1$.

1. В.Я.Кравченко, Э.И.Рашба, ЖЭТФ **56**, 1713 (1969).
2. В.С.Цой, И.И.Разгонов, Письма в ЖЭТФ **23**, 107 (1976).
3. В.С.Цой, Письма в ЖЭТФ **19**, 114 (1974).
4. С.И.Божко, И.Ф.Свекло, В.С.Цой, ФНТ **15**, 710 (1989).
5. С.И.Божко, В.С.Цой, С.Е.Яковлев, Письма в ЖЭТФ, **36**, 123 (1982).
6. С.И.Божко, В.С.Цой, ФНТ **13**, 1139 (1987).
7. В.С.Цой, Ю.А.Колесниченко, ЖЭТФ, **78**, 2041 (1980).
8. В.В.Андриевский, Е.И.Асс, Ю.Ф.Комник, ФНТ **11**, 1148 (1985).
9. И.Ф.Свекло, В.С.Цой, Письма в ЖЭТФ **49**, 290 (1989).