

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТУННЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ 2D-СОСТОЯНИЙ

Г.М.Миньков, А.В.Германенко, В.В.Кружаев, О.Э.Рут, В.А.Ларионова

Институт физики и прикладной математики при Уральском университете

620083 Екатеринбург, Россия

Поступила в редакцию 10 июля 1995 г.

Предложено развитие метода туннельной спектроскопии, позволяющее исследовать спектр двумерных (2D)-состояний в широком диапазоне энергий при контролируемо меняемой глубине поверхностной квантовой ямы. Новые возможности метода продемонстрированы на примере исследований 2D-состояний в бесщелевом HgCdTe.

Туннельная спектроскопия является хорошо известным, хоть и мало распространенным, методом исследования энергетического спектра полупроводников [1]. Суть этого метода ясна из рис.1а, на котором изображена энергетическая диаграмма туннельного контакта металл-изолятор-полупроводник при наличии поверхностного потенциала в полупроводнике и локализованных в нем 2D-состояний. Напряжение V , приложенное к контакту, смещает уровень Ферми металла относительно уровня Ферми полупроводника (E_F) на величину eV , и туннельный ток $j(V)$ определяется количеством состояний носителей в полупроводнике в интервале энергий от E_F до $E_F + eV$ [2,3]. В эксперименте измеряемой величиной обычно является дифференциальная проводимость $\sigma_d(V) = dj(V)/dV$ и ее производная по напряжению. В квантующем магнитном поле B дифференциальная проводимость осциллирует с изменением B и V , имея максимумы всякий раз, когда максимумы плотности состояний полупроводника, связанные с уровнями Ландау, пересекают энергию $E_F + eV$. Таким образом, во всем диапазоне энергий, соответствующем диапазону смещений, в котором наблюдаются осцилляции туннельной проводимости, можно получить информацию об объемных и о 2D-состояниях [4,5]. В отличие от гальваномагнитных измерений и вольт-емкостной спектроскопии, которые позволяют изменять поверхностный потенциал φ и, следовательно, концентрацию 2D-носителей, но дают информацию только о состояниях с энергией Ферми, туннельная спектроскопия позволяет получать информацию об электронных состояниях в широком диапазоне энергий как выше, так и ниже уровня Ферми.

Важным при исследованиях 2D-состояний методом туннельной спектроскопии является то, что при изменении смещения на контакте может одновременно меняться и величина φ_s [5]. Это изменение определяется толщиной барьера, плотностью зарядов в области пространственного заряда, плотностью локализованных в диэлектрике и на границе диэлектрик-полупроводник состояний и в традиционно используемой методике туннельной спектроскопии не контролируется.

Описанное в настоящей работе развитие метода туннельной спектроскопии позволяет исследовать 2D-состояния с любой заданной энергией, изменяя при этом глубину поверхностной квантовой ямы независимо.

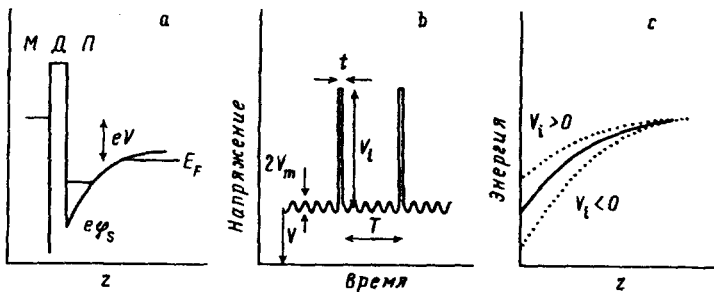


Рис.1. а - Энергетическая диаграмма туннельного контакта металл - диэлектрик - полупроводник; б - временная диаграмма напряжения, подаваемого на туннельный контакт; с - приповерхностный изгиб зон и его изменение при приложении импульсов разной полярности

Традиционная модуляционная методика измерения малых нелинейностей вольт-амперной характеристики состоит в том, что на контакт наряду с постоянным напряжением подается малое по амплитуде напряжение модуляции V_m (рис.1б). Переменная составляющая тока на частоте модуляции f будет пропорциональна дифференциальной проводимости, а на двойной частоте - производной от дифференциальной проводимости по V . Дополнительные короткие, длительностью $t \ll 1/f$, но редкие, с периодом $T \gg 1/f$, импульсы, подаваемые на туннельный контакт, будут перезаряжать локализованные в диэлектрике или на границе диэлектрик-полупроводник состояния. Если время релаксации заряда этих состояний много больше T , это приведет к увеличению или к уменьшению, в зависимости от знака импульсов, глубины поверхностной квантовой ямы (рис.1с). Таким образом, регистрируя переменную составляющую тока в промежутках между импульсами, можно получать информацию о 2D-состояниях с энергией $E_F + eV$ при различной глубине потенциальной ямы.

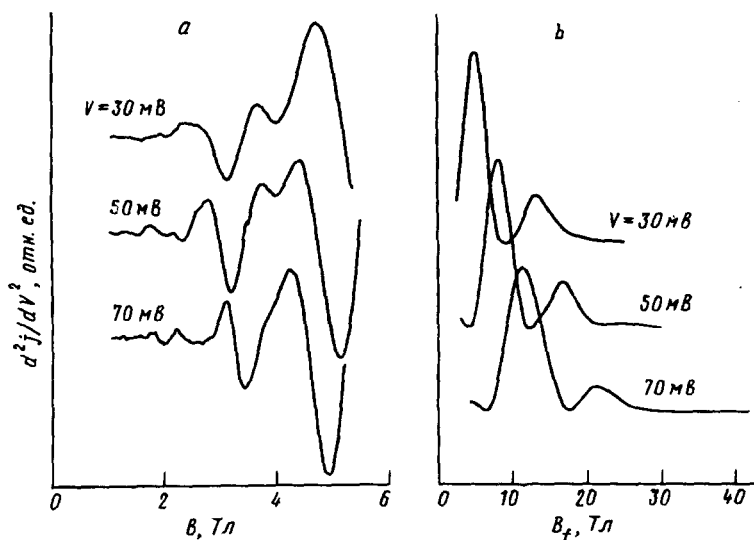


Рис.2. Зависимости d^2j/dV^2 от магнитного поля (а) и результаты фурье-преобразования, полученные при различных смещениях (б). Магнитное поле направлено по нормали к плоскости туннельного контакта

Возможности предложенного метода мы продемонстрируем на примере исследования спин-орбитального расщепления спектра 2D электронных состояний в поверхностной квантовой яме бесщелевого полупроводника $p\text{-HgCdTe}$.

Были исследованы осцилляции туннельной проводимости контактов Уь-окисел- $p\text{-HgCdTe}$ с $E_g = -120$ мэВ и концентрацией нескомпенсированных акцепторов $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в магнитном поле до 5,5 Тл при температуре 4,2 К. В таких структурах малая работа выхода Уь приводит к образованию поверхностного изгиба зон в полупроводнике и появлению 2D-состояний. Энергия Ферми в полупроводнике определялась согласно [3] и в исследованном образце составляла $-(5 \pm 2)$ мэВ (энергия отсчитывается от дна зоны проводимости).

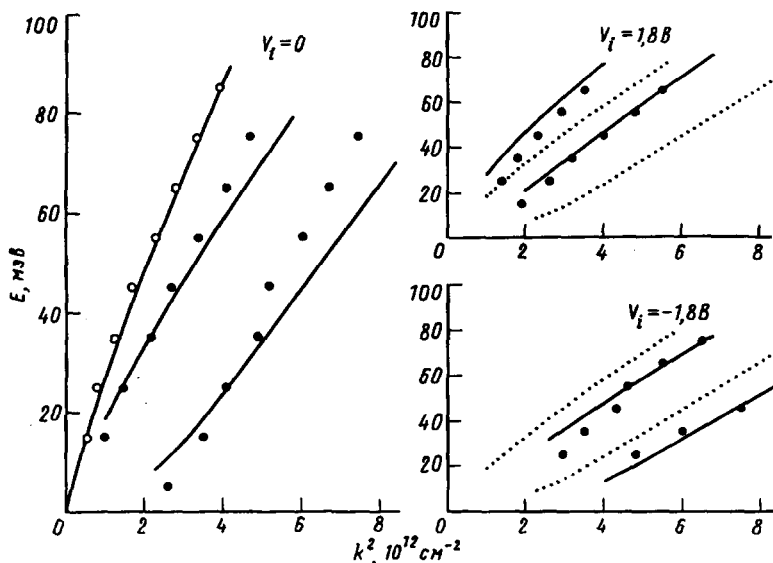


Рис.3. Закон дисперсии объемных и двумерных поверхностных состояний, полученный традиционным способом ($V_i = 0$) и при приложении дополнительных импульсов напряжения разной полярности. \circ и \bullet — экспериментальные законы дисперсии для объемных и 2D состояний, соответственно. Линии — результаты теоретического расчета при использовании величины φ_s , равной 200 ($V_i = 0$), 200 ($V_i = -1,8$ В) и 155 мВ ($V_i = 1,8$ В). На рисунках справа для сравнения пунктирными линиями показан закон дисперсии 2D состояний при $V_i = 0$

Типичные зависимости осциллирующей части туннельной проводимости от магнитного поля приведены на рис.2а. Видно, что они представляют собой суперпозицию нескольких типов осцилляций с различной частотой, которые хорошо разрешаются при фурье-анализе (рис.2б). Фундаментальная частота определяется площадью экстремального сечения изоэнергетической поверхности S с энергией $E = E_F + eV$: $B_f = c\hbar S(E)/2\pi e$. В материалах с изотропным законом дисперсии $S(E) = \pi k^2$. Таким образом, измерения осцилляций при различных смещениях дают возможность определить зависимость квазиимпульса от энергии. На рис.3 представлены экспериментальные зависимости $E(k^2)$ для объемных и поверхностных состояний, полученные описанным способом на одном и том же туннельном контакте. Энергетический спектр объемных состояний получен из измерений в ориентации $B \perp n$ (n — нормаль к плоскости туннельного контакта), при которой осцилляций, связанных с 2D-состояниями, нет, поскольку их энергетический спектр не квантуется в этой ориентации

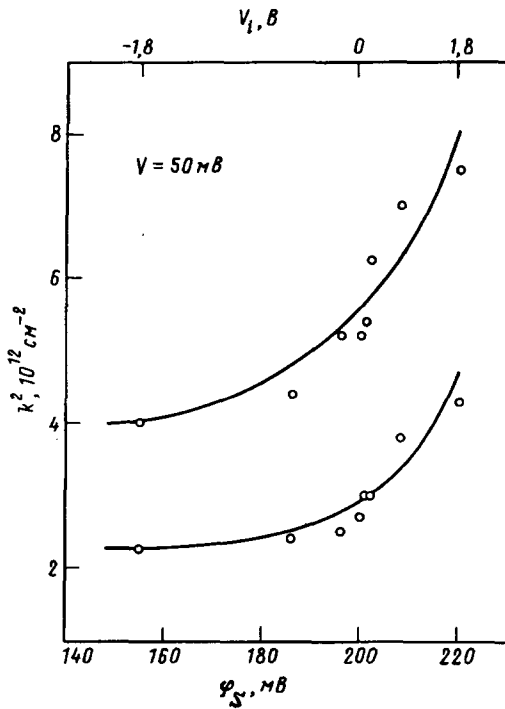


Рис.4. Зависимость величины квазиимпульса для двух ветвей энергетического спектра 2D-состояний от величины поверхностного потенциала при $V = 50 \text{ мВ}$, что соответствует энергии $E = 45 \text{ мэВ}$. Кривые проведены по экспериментальным точкам

магнитного поля. Закон дисперсии 2D-состояний получен при $B \parallel n$. На этом же рисунке показаны законы дисперсии 2D-состояний, полученные при приложении к структуре дополнительных импульсов различной полярности с $t = 1 \text{ мкс}$, $T = 30 \text{ мс}$ и амплитудой $1,8 \text{ В}$ при частоте модуляции $f = 740 \text{ Гц}$. Видно, что дополнительные импульсы приводят к изменению закона дисперсии. При приложении к полупроводниковому электроду импульсов положительной полярности энергия 2D-состояний при данном значении квазиимпульса увеличивается, а при приложении отрицательных – уменьшается. Из этого следует, что положительные импульсы уменьшают поверхностный потенциал, а отрицательные увеличивают.

На рис.3 приведены также результаты расчета спектра 2D-состояний, локализованных в поверхностной квантовой яме на границе бесщелевой полупроводник–диэлектрик. В расчетах полагалось, что диэлектрик является кейновским полупроводником с большой шириной запрещенной зоны [5]. Задача решалась с использованием техники прямого интегрирования. Как видно из рисунка, теоретические зависимости $E(k^2)$ удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами при использовании величины поверхностного потенциала φ_s в качестве подгоночного параметра. Расчет показал, что наблюдаемые нами ветви закона дисперсии являются двумя ветвями одной размерно квантованной зоны, расщепленной спин-орбитальным взаимодействием в несимметричной квантовой яме. Кроме того, сравнение результатов расчета с экспериментом позволяет определить изменение глубины поверхностной квантовой ямы при изменении амплитуды приложенных импульсов. На исследованном туннельном контакте изменение амплитуды импульсов в интервале

-1,8.. +1,8 В приводило к изменению глубины поверхностной квантовой ямы в диапазоне 220 – 150 мэВ.

Такой метод измерения дает возможность при заданной энергии экспериментально определить соотношение между величинами квазиимпульсов 2D-ветвей в зависимости от величины поверхностного потенциала (рис.4). В отличие от вольт-емкостной спектроскопии и гальваномагнитных исследований, которые позволяют получить такую зависимость только для одной энергии, равной энергии Ферми, в описанной методике энергия исследуемых состояний задается приложенным к туннельному контакту напряжением и может быть произвольной в тех пределах, пока наблюдаются осцилляции туннельной проводимости в магнитном поле (как правило это 100..300 мэВ).

Таким образом, развитие метода туннельной спектроскопии позволяет совместить достоинства гальваномагнитных и вольт-емкостных измерений с достоинствами туннельной спектроскопии, то есть получать информации о 2D-состояниях в широком диапазоне энергий при различной глубине поверхностной квантовой ямы.

Работа частично финансирована программой "Университеты России" и Госкомитетом Российской Федерации по высшему образованию.

-
1. E.L.Wolf, Sol. St. Phys. **30**, 1 (1975).
 2. D.C.Tsui, Phys. Rev. **В8**, 2567 (1973).
 3. Л.П.Зверев, В.В.Кружаев, Г.М.Миньков, О.Э.Пут, ЖЭТФ **80**, 1163 (1981).
 4. R.Winkler, U.Kunse, and U.Rössler, Sur. Sci. **263**, 222 (1992).
 5. Г.М.Миньков, О.Э.Пут, В.А.Ларионова, А.В.Германенко, ЖЭТФ **105**, 719 (1994).
 6. P.Sobkowicz, Semicond. Sci. Technol. **5**, 183 (1990).