

07

„Артефакты“ в нанозондовых измерениях: квантование проводимости, поведение доноров и автоэмиссия в системе подложка–нанозонд

© В.И. Корепанов, О.В. Трофимов, С.Ю. Шаповал

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
e-mail: shapoval@iptm.ru

Поступило в Редакцию 23 января 2026 г.
В окончательной редакции 5 апреля 2026 г.
Принято к публикации 17 апреля 2026 г.

Представлены результаты экспериментального исследования артефактов, возникающих при использовании нанозондов с одиночным атомом на острие в сканирующей туннельной микроскопии и в качестве наноэмиттеров. Методом электрохимического травления и последующей плазменной очистки были изготовлены вольфрамовые зонды с радиусом кривизны порядка 10 \AA . В экспериментах по сближению и удалению зонда с поверхности золотой пленки наблюдалось квантование проводимости в единицах $2e^2/h$ и его долей, что связано с формированием нанопроводящих каналов. Исследования поверхности легированного полупроводника GaAs показали, что электроны доноров, расположенных в приповерхностном слое, остаются локализованными и не участвуют в проводимости, тогда как электроны подповерхностных доноров вносят вклад в проводимость, что проявляется в контрасте СТМ-изображений. В многослойных гетероструктурах с дельта-легированием зарегистрированы осцилляции дифференциальной проводимости, указывающие на латеральное квантование носителей заряда. Кроме того, для вольфрамовых наноэмиттеров размером $\sim 1 \text{ nm}$ обнаружены отклонения от закона Фаулера–Нордгейма и осцилляции дифференциальной проводимости, что свидетельствует о наличии размерного квантования в зоне проводимости. Результаты демонстрируют значительное влияние наноразмерных эффектов на результаты зондовых измерений и могут быть использованы для разработки методов нанозлектроники и диагностики материалов с атомарным разрешением.

Ключевые слова: сканирующая туннельная микроскопия, квантование проводимости, нанозонд, размерное квантование, наноэмиттер.

DOI: 10.61011/JTF.2026.08.63367.11-26

Введение

Применение заостренных зондов в качестве электрических контактов к твердому телу берет начало с конца XIX в. Вначале они использовались в качестве контактов к кристаллам II–VI [1] и углеродистой стали [2] (cat's whisker) при создании кристаллических детекторов радиоприемников. В 1960-х такие зонды стали успешно применяться в методе измерения сопротивления растекания для измерения проводимости и удельного сопротивления и субмикронного профилирования электрически активных легирующих примесей в кремнии [3–7]. После создания сканирующего туннельного микроскопа [8,9] метод сопротивления растекания стал основываться и на СТМ (сканирующая туннельная микроскопия) для исследования проводимости и удельного сопротивления кремниевых структур и ряда других материалов [10,11]. Помимо возможности исследования поверхности проводящих кристаллов с атомарным разрешением [12] начала развиваться и методика сканирующей туннельной спектроскопии [13]. Одновременно развитие технологии зондов для СТМ позволило изготавливать такие зонды с одиночным ато-

мом на острие [14]. В связи с малыми размерами области контакта с твердым телом (один атом или несколько на острие) физические свойства последнего значительно отличаются от параметров традиционных контактов большей площади. К таким особенностям можно отнести ван-дер-ваальсово притяжение атома на острие к массиву контактирующего твердого тела величиной около 10^{-7} N [15], достаточное для смещения атома на острие зонда в сторону атомов контактирующего твердого тела, квантование проводимости [16–20], доноры на верхнем слое монокристалла наблюдаются как локализованные образования, тогда как носители зарядов подповерхностных атомов делокализованы [21–23], адсорбция элементарных газов существенно влияет на исследование поверхности монокристаллов [24]. Измерения тока автоэмиссии в вакууме электронов из зонда с одним атомом на острие демонстрируют заметное отклонение от линейности на диаграммах Фаулера–Нордгейма [25,26] и в ряде экспериментов наблюдается интенсивное электромагнитное излучение в THz-диапазоне [27–32].

В настоящей работе мы исследовали физические эффекты, возникающие в системе подложка–нанозонд при

использовании зондов с одиночным атомом на острие. К их числу относятся квантование проводимости, различие в наблюдаемом поведении доноров в приповерхностных и подповерхностных слоях полупроводника, а также особенности автоэмиссии электронов из наноразмерных эмиттеров.

1. Эксперимент

Для изготовления зондов использовалась вольфрамовая проволока диаметром 0.5 mm после двухстадийной электрохимической обработки и плазмохимической очистки в смеси Ag–H₂ [14]. На первой стадии для получения гиперболического конуса травление проводилось на постоянном токе, на второй стадии — на переменном токе для очистки поверхности и заострения нанозонда за счет формирования линейного конуса травления.

В электрохимической ячейке вольфрамовая проволока служила анодом, катод изготавливался из золотой проволоки диаметром 0.5 mm в форме кольца диаметром 40 mm. Катод помещали в раствор вблизи границы раздела воздух–электролит. Вольфрамовая проволока опускалась манипулятором в электролит (2-молярный раствор NaOH) в центре этого катодного кольца. Длина вольфрамовой проволоки в растворе составляла ~ 2 mm. Время травления составляло ~ 12 min при начальном напряжении между электродами ~ 5 V. Когда нижняя часть проволоки опускалась и ток травления уменьшался до дребезга тока перед отрывом, электронная схема на основе быстродействующего компаратора отключала ток, замыкала электрохимическую ячейку и заземляла вольфрамовую проволоку. Последняя процедура защищала нанозонд от паразитного травления при образовании плавающих потенциалов в электрохимической ячейке и, как следствие, затупления зонда при остаточном травлении.

На второй стадии нанозонд обрабатывался в той же электрохимической ячейке с использованием водного раствора 20% Na₂SO₃ и 0.5% гидрохинона в качестве электролита с приложением десяти периодов синусоидального напряжения амплитудой 10 V и частотой 400 Hz между нанозондом и золотым электродом.

На третьей стадии нанозонды очищались в микроволновой аргон-водородной плазме в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) при суммарном давлении 0.8 mTorr (H₂:Ar = 10:1), поглощенной микроволновой мощности 200 W в течении 20 min. В процессе плазменной обработки нанозонды находились на изолированном держателе, т. е. находились под плавающим потенциалом, что гарантировало отсутствие электрических разрядов между плазмой и нанозондом [14]. В результате этих обработок мы изготавливали нанозонды с видимым в просвечивающем электронном микроскопе радиусом кривизны R менее 20 Å и углом α раскрытия менее 20° (рис. 1).

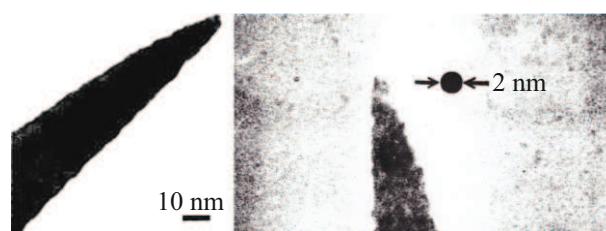


Рис. 1. ПЭМ-изображения вольфрамового наконечника после двухстадийного травления и очистки ЭЦР-плазмой H₂–Ag. Радиус кривизны $R < 20$ Å; угол раскрытия $\alpha < 20^\circ$.

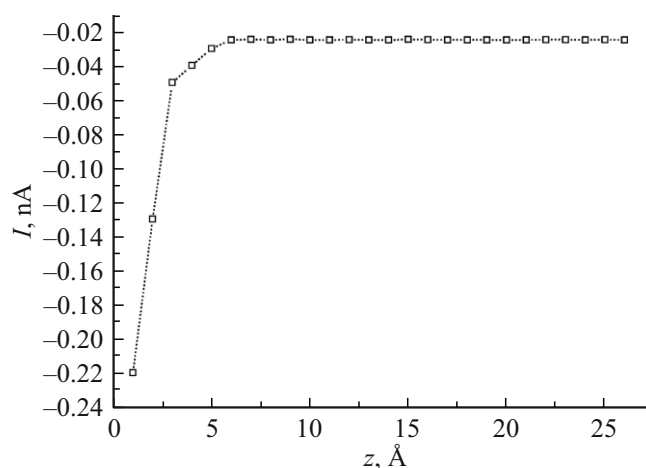


Рис. 2. Зависимость тока „нанозонд–поверхность“ от расстояния. Высота барьера в данном случае $\psi = 2.22$ eV, $A = 1.025$ рассчитывалась по зависимости I (A/cm²) = $(3.1 \cdot 10^{10} AV\psi^{1/2}Z) \exp(-AZ\psi^{1/2})$; напряжение на зонде $V = -5$ V.

Для получения изображений поверхности подложки с атомарным разрешением использовался сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) JEOL JSTM-4500XT. Образцы откачивались *in situ* в сверхвысоковакуумной камере СТМ при давлении $6 \cdot 10^{-10}$ Torr. Полученные таким образом атомарно плоские поверхности GaAs (110) (легированные оловом, $1 \cdot 10^{18}$ cm⁻³) имеют низкую плотность дефектов, которые не изменяют уровень Ферми на границе раздела вакуум–полупроводник [33].

Перед проведением экспериментов с применением нанозондов последние тестировались в сканирующем туннельном микроскопе по величине работы выхода в туннельном режиме (измерение зависимости тока зонда от расстояния зонд–поверхность). Все измерения проводились в условиях, когда высота барьера нанозонд–поверхность была более 1 eV, что означает, что данная точка поверхности и нанозонд не содержат загрязнений (рис. 2), так как наличие диэлектрических пленок в месте контакта существенно понижает высоту барьера.

2. Результаты и обсуждение

Известно, что введение зонда сканирующего туннельного микроскопа в металлическую поверхность и последующее его вытягивание приводит к образованию нанометрового канала проводимости между электродами [16,18]. Можно предполагать, что канал проводимости может формироваться, согласно двум моделям: при приближении к поверхности на некотором малом расстоянии ближний к поверхности образец атом за счет ван-дер-ваальсовых сил выдвигается навстречу поверхности образца (оценки дают величину около 40% межатомного расстояния), формируя так называемую полевую констрикцию, по второй модели сближение зонда с поверхностью подложки приводит к его смачиванию атомами металлической подложки и при обратном движении формируется нанопроволока.

В качестве объектов для исследования квантования проводимости служили вольфрамовые зонды, полученные по описанной выше технологии и высоколегированные кремниевые подложки с термически напыленным слоем золота толщиной 200 nm. Измерения зависимости тока от расстояния „нанозонд–подложка“ проводили при сближении и обратном движении зонда относительно подложки.

Измеренная зависимость проводимости от расстояния „нанозонд–поверхность“ демонстрирует четкие признаки баллистического квантования в единицах $2e^2/h$ (рис. 3). При сближении зонда с образцом наблюдаются 2–3 дискретных ступени, соответствующих целочисленным значениям проводимости. При дальнейшем продвижении зонда за третью ступень регистрируются резкие многоконтактные скачки проводимости (рис. 4). Мы связываем это изменение режима с тем, что острие, преодолевая упругую деформацию, начинает пластически внедряться в золотую пленку. При этом площадь

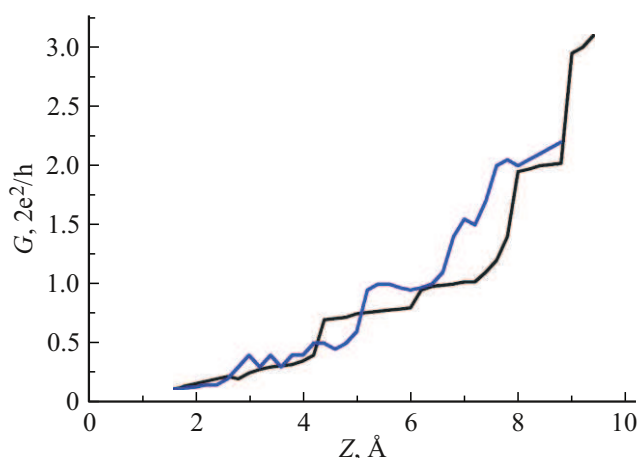


Рис. 3. Проводимость контакта между вольфрамовым нанозондом и поверхностью золотой пленки в зависимости от расстояния между нанозондом и поверхностью: движение к поверхности, $V = -2.6$ В (черная кривая), движение от поверхности, $V = -1.6$ В (синяя кривая).

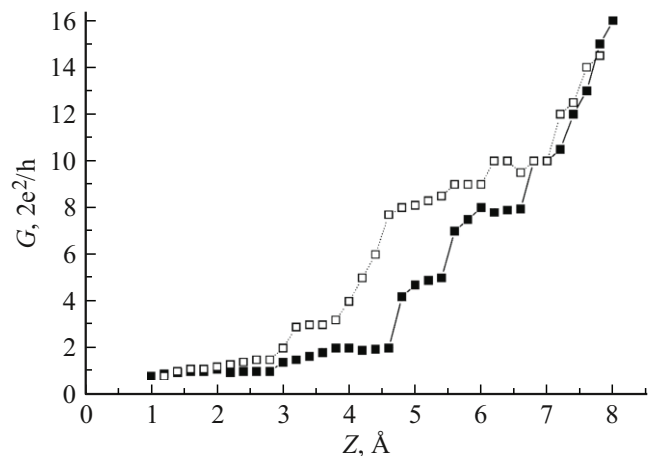


Рис. 4. Проводимость контакта между вольфрамовым нанозондом и поверхностью золотой пленки в зависимости от расстояния между нанозондом и поверхностью: движение к поверхности, $V = -0.4$ В (сплошные точки), движение от поверхности, $V = -0.4$ В (пустые квадраты).

атомарного контакта увеличивается за счет вовлечения более широких кристаллографических плоскостей тела зонда. В обратном ходе, при аккуратном удалении зонда, когда площадь контакта уменьшается, на кривой проводимости наблюдается дополнительная ступенька величиной e^2/h . Мы интерпретируем ее как проявление спинового эффекта — снятия вырождения по спину электронов в предельно узком канале, образованном вольфрамовым острием.

В принципе, у исследователя (и читателя) могут возникнуть сомнения о квантовании не за счет применения нанозонда, а проводимости по поверхностным загрязнениям с участием органических загрязнений (здесь мы опираемся на литературные данные [34–36]). Поэтому, в частности, имеет смысл проводить измерения при различных потенциалах зонда. Поведение наноконтактов при различных потенциалах нанозондов ранее нами изучалось [16].

Исследования поверхности полупроводников с помощью сканирующей электронной микроскопии [21,22,24,37–41] выявило ряд особенностей при наблюдении поведения доноров, расположенных на поверхности кристаллов и в следующих от поверхности кристаллографических плоскостях [21,22]. Как правило, для получения чистых поверхностей в подобных исследованиях образцы скальваются *in situ* в сверхвысоковакуумной камере СТМ при давлении порядка 10^{-10} Торр. Полученная таким образом атомно-плотная поверхность, как правило, имеет низкую плотность дефектов, которые не закрепляют уровень Ферми на границе раздела вакуум–полупроводник [33].

На рис. 5 показано крупномасштабное СТМ-изображение поверхности (110) GaAs, легированном Sn [22], на котором отчетливо видна атомная гофрировка в направлении, перпендикулярном [110], кроме того, на-

блюдаются случайные белые образования размером 1.5–4.5 nm. Эти особенности очень похожи на те, что наблюдались в работе [21] для GaAs, легированного Si, и приписываются подповерхностному Si в различных подповерхностных слоях. Различные подповерхностные особенности Sn при одном и том же смещении могут иметь различную видимую высоту и ширину, которые были измерены путем профилирования поперек особенностей. Среднее значение высоты для Sn из первого подповерхностного атомного слоя равнялось 0.23 nm со стандартной погрешностью 0.016 nm, но ширина варьировалась в диапазоне 1.5–4.5 nm. В то же время можно наблюдать локализованные объекты на сколотой поверхности GaAs (110) (рис. 5). Для поверхности GaAs (110), легированной Si, расчеты показывают [33], что дополнительный электрон замещающего атома Si в позиции Ga на поверхности локализуется вокруг атома Si, создавая поверхностный дефект Si(G), который наблюдался как локализованная особенность с помощью сканирующего туннельного микроскопа [21]. Можно предположить, что локализованные особенности на рис. 5 соответствуют атому Sn, расположенному в верхнем слое поверхности, аналогично наблюдению для легирования Si в работе [21]. Экспериментально локализацию можно наблюдать при сканировании поперек донора на поверхности и донора, расположенного на нижележащей плоскости, как показано на рис. 6.

В отличие от естественной локализации электронов на точечных дефектах, описанной выше, с помощью нанозонда с радиусом острия порядка 1–5 nm можно искусственно создавать область пространственного

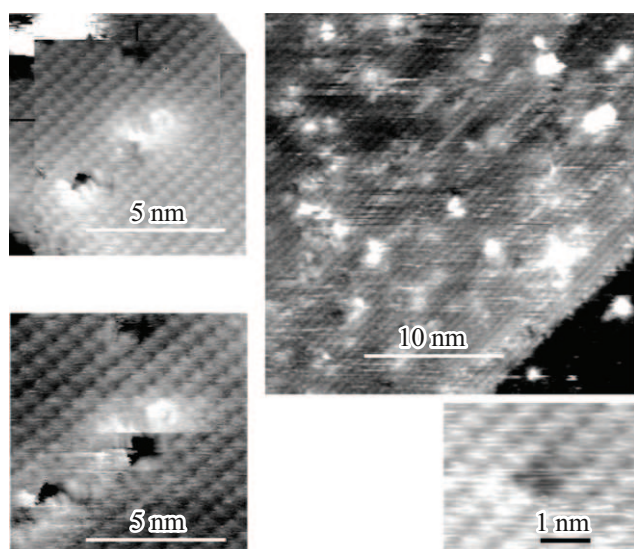


Рис. 5. Крупномасштабное изображение скола GaAs (110), легированного Sn. Случайные белые особенности соответствуют подповерхностным донорам Sn ($I = 0.1$ nA, $V = -3$ V) (справа сверху). Изображение заполненного состояния атома Sn на верхнем слое скола GaAs (110), легированного Sn ($I = 0.1$ nA, $V = -3$ V). В то же время можно наблюдать локализованные объекты на сколотой поверхности GaAs (110) (слева и внизу).

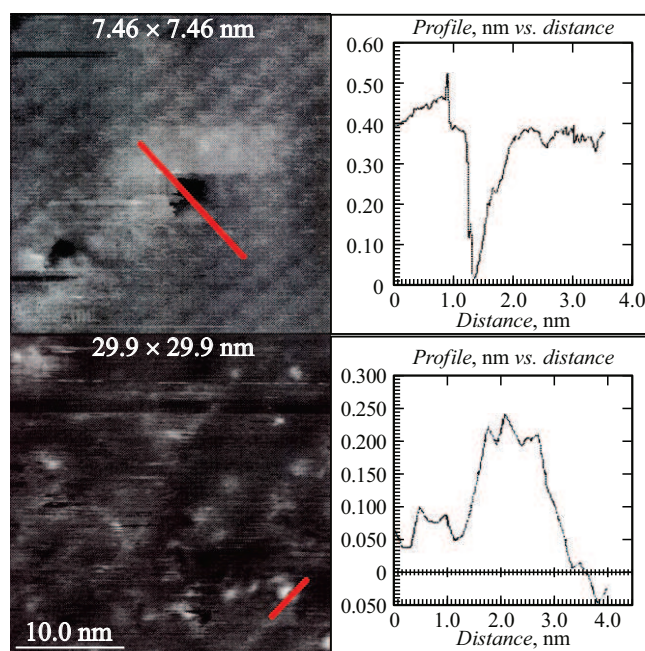


Рис. 6. Особенности измерения тока при сканировании поперек донора на поверхности (электрон локализован) и донора, расположенного на нижележащей плоскости (электрон делокализован). Приведено изображение скола GaAs (110), легированного Sn ($V = -3$ V; вертикальная шкала на графиках соответствует току в nA).

ограничения (квантования) носителей заряда в приповерхностном слое. Это проявляется в туннельных экспериментах вблизи поверхности полупроводника как латеральное ограничение протекающего тока [42,43]. Таким образом, электростатическое латеральное ограничение, создаваемое нанозондом, может решить проблемы ограничений литографии, т.е. создать как электрический контакт с полупроводниковой структурой, так и латеральное ограничение порядка 5–20 nm (в зависимости от радиуса нанозонда, приложенного напряжения и расстояния между остриями и образцами). Латеральное ограничение может проявляться в виде колебаний дифференциальной проводимости приповерхностной гетероструктуры на воздухе при комнатной температуре [42,43].

Для верификации эффекта латерального квантования были исследованы две структуры. Первая структура состоит из подложки n^+ -GaAs, буферного слоя n^+ -GaAs толщиной 500 nm, непреднамеренно легированного (UID) слоя толщиной 5 nm, легированного Si дельта-слоя с концентрацией $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 5 nm UID слоя и 5 nm n^+ покровного слоя. Два верхних слоя структуры представляют собой область, где ожидается латеральное электростатическое квантование. Вторая структура состоит из толстого эпитаксиального слоя n^+ -GaAs на подложке n^+ -GaAs. Численное решение уравнения Пуассона показало, что смещение на игле создает латераль-

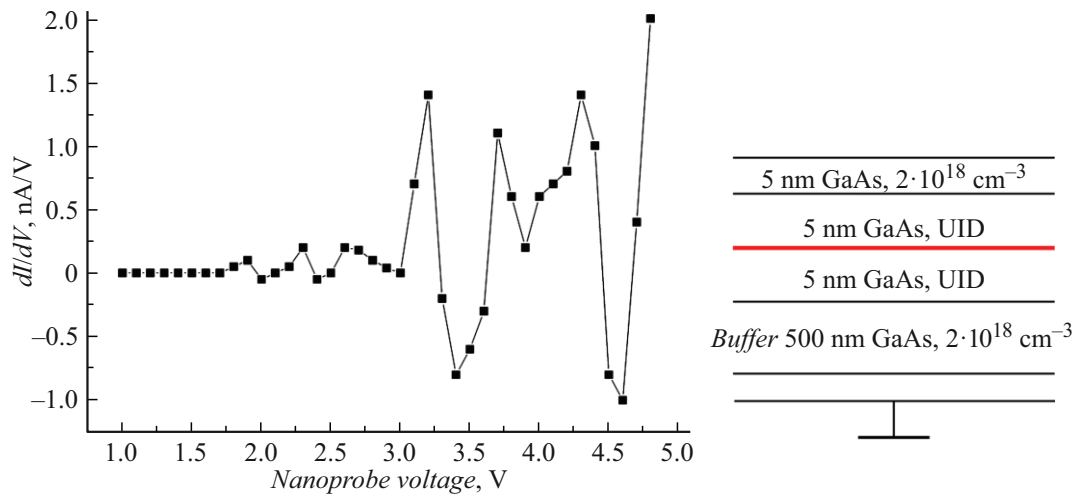


Рис. 7. Осцилляции дифференциальной проводимости для структуры GaAs с дельта-слоем (слева) и схема структуры (справа). Дельта-слой между двумя слоями GaAs показан красной линией.

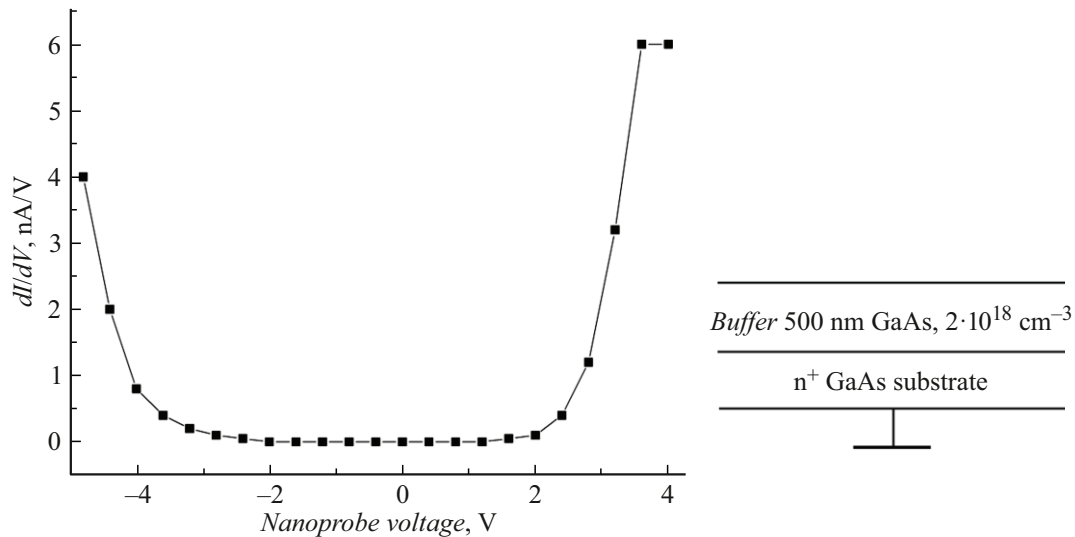


Рис. 8. Зависимость дифференциальной проводимости от напряжения на нанозонде для структуры n^+ -GaAs (слева) и схема структуры (справа). Осцилляции дифференциальной проводимости отсутствуют.

ный ограничивающий потенциал в двух верхних слоях структуры (общая толщина 10 nm) [43]. Этот потенциал имеет приблизительно параболическую форму с эквидистантными энергетическими уровнями. Известно, что в V-образной потенциальной яме дельта-легированного GaAs с концентрацией $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ существует только один энергетический уровень [44,45]. Несмотря на то, что этот уровень один, латеральный ограничивающий потенциал, индуцированный нанозондом, создает последовательность уровней размерного квантования (подобно спектру двумерного гармонического осциллятора). При изменении напряжения смещения эти уровни последовательно входят в резонанс с единственным уровнем дельта-ям, что приводит к периодическим осцилляциям дифференциальной проводимости [42]. Измерения ВАХ

проводились в точках образца, где высота барьера между иглой и поверхностью превышает 1 eV, что означает отсутствие загрязнений в этой точке поверхности. Мы воспроизводимо наблюдали осцилляции дифференциальной проводимости для подложки с дельта-ямой (рис. 7). Для структур n^+ -GaAs осцилляции дифференциальной проводимости не наблюдались (рис. 8). Период зависел от расстояния между нанозондом и поверхностью образца, что демонстрируется зависимостью среднего периода dI/dV -осцилляции (ΔV) от проводимости между нанозондом и образцом для структуры GaAs с дельта-слоем (рис. 9), так как проводимость между зондом и образцом напрямую связана с расстоянием между ними. Эти колебания проявляют признаки наличия латерального квантования.

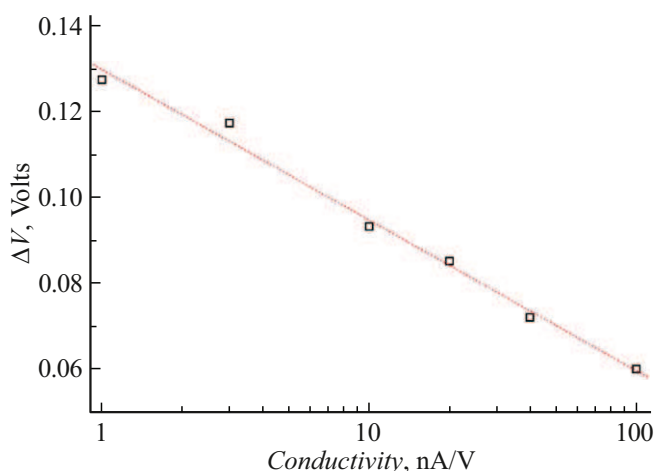


Рис. 9. Зависимость среднего периода dI/dV -осцилляции (ΔV) от проводимости между нанозондом и образцом для структуры GaAs с дельта-слоем.

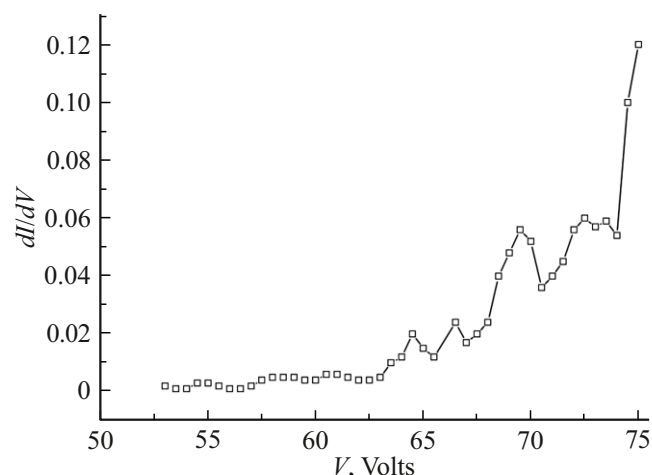


Рис. 11. Экспериментальная зависимость $dI/dV(V)$. Вольфрамовый эмиттер с размером острия 1 nm, вакуум 10^{-10} Торр, расстояние до плоского анода 10 μm .

3. Экспериментальное наблюдение тока, протекающего через металлический нанозонд

Исследование индуцированной электрическим полем эмиссии электронов из вольфрамового нанозонда радиусом около 1 nm выявило значительное отклонение зависимости $I(V)$ от предсказанной законом Фаулера–Нордгейма [25,26] (рис. 10). Зависимость $dI/dV(V)$ демонстрирует осцилляции производной тока по напряжению, что проявляет признаки наличия уровней размерного квантования в зоне проводимости вольфрамовых наноэмиттеров (рис. 11).

Следует различать два режима, в которых могут наблюдаться осцилляции на зависимости $dI/dV(V)$. При малых напряжениях (до ~ 1 V), когда транспорт через

контакт определяется баллистическим прохождением электронов через одномерные каналы, осцилляции связаны с последовательным включением новых подзон проводимости, как это описано в модели [16]. При высоких напряжениях (превышающих работу выхода, $\sim 4\text{--}5$ V для вольфрама) доминирует полевая эмиссия, и наблюдаемые осцилляции могут быть обусловлены интерференционными резонансами в треугольном барьере (резонансы Фаулера–Нордгейма). В наших экспериментах осцилляции $dI/dV(V)$ зарегистрированы в области напряжений, характерных для полевой эмиссии, что позволяет интерпретировать их как проявление размерного квантования в зоне проводимости наноэмиттера.

Заключение

Проведенные исследования демонстрируют, что использование атомарно-острых нанозондов приводит к ряду фундаментальных наноразмерных эффектов, которые необходимо учитывать при интерпретации данных СТМ и экспериментов по эмиссии. Установлено, что в контакте металл–металл на субнанометровых расстояниях наблюдаются четкие признаки квантования баллистической проводимости со скачками, кратными кванту проводимости $2e^2/h$ и его долям. Разрешающая способность СТМ позволяет различать локализованные (поверхностные) и делокализованные (подповерхностные) состояния доноров в полупроводниках. Нанозонд может выступать в роли латерального затвора, индуцируя электростатическое квантование в приповерхностных слоях гетероструктур, что проявляется в осцилляциях дифференциальной проводимости. Вольфрамовые наноэмиттеры радиусом ~ 1 nm проявляют свойства квантово-размерных объектов, что выражается в отклонении от макроскопического закона Фаулера–Нордгейма и осцилляциях дифференциальной проводимости на ВАХ.

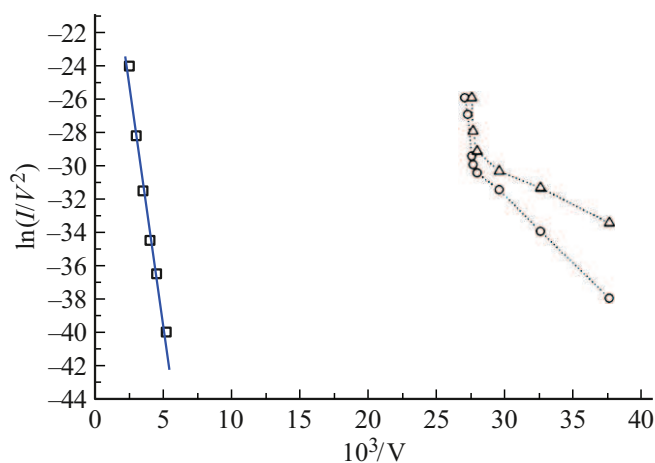


Рис. 10. Диаграмма Фаулера–Нордгейма для вольфрамового эмиттера с диаметром острия 15 nm (слева) и вольфрамового эмиттера с диаметром острия 1 nm (справа; приведены данных двух отдельных измерений). Вакуум 10^{-10} Торр.

Таким образом, наблюдаемые „артефакты“ являются закономерными проявлениями квантово-размерных эффектов в атомарном контакте. Это позволяет использовать нанозонд не только как пассивный сенсор, но и как активный элемент для создания и исследования мезоскопических квантовых систем *in situ*. Полученные результаты важны для развития методов нанодиагностики, проектирования нанoeлектронных устройств и понимания явлений переноса на атомарном уровне.

Финансирование работы

Работа проводилась в рамках государственного задания № 075-00296-26-00.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Braun. *Annalen Der Physik*, **229**, 556–563 (1875). <https://doi.org/10.1002/andp.18752291207>
- [2] G.W. Pickard. *Detector for wireless telegraphy and telephony*, (US1104073A, 1914), <https://patents.google.com/patent/US1104073/en> (accessed December 23, 2025).
- [3] D.H. Dickey, J.R. Ehrstein. *Spreading resistance analysis for silicon layers with nonuniform resistivity* (National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1979). <https://doi.org/10.6028/NBS.SP.400-48>
- [4] D.H. Dickey. *The Electrochem. Society*, **12**, 151 (1963).
- [5] G.F. Lymar. *Russ. Electrical Engineering, Series 2 Semiconductor Devices*, **4**, 3 (1970).
- [6] S.Yu. Shapoval, I.I. Lapidus, V.A. Malyshev. *Russ. Microelectron, Series 3*, **1**, 10 (1978).
- [7] I.I. Lapidus, S.Yu. Shapoval, V.A. Malyshev. *Factory Laboratory*, **43**, 335 (1978).
- [8] G. Binnig, H. Rohrer, G. Binnig, H. Rohrer. *Rev. Mod. Phys.*, **59**, 615 (1987). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.59.615>
- [9] G. Binnig, H. Rohrer, G. Binnig, H. Rohrer. *Surface Sci.*, **126**, 236 (1983). [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(83\)90716-1](https://doi.org/10.1016/0039-6028(83)90716-1)
- [10] I. Shiraki, T. Nagao, S. Hasegawa, C.L. Petersen, P. Bøggild, T.M. Hansen, F. Hansen. *Surf. Rev. Lett.*, **07**, 533 (2000). <https://doi.org/10.1142/S0218625X00000592>
- [11] В.А. Смирнов, Р.В. Томинов, Н.И. Алябьева, М.В. Ильина, В.В. Полякова, Ал.В. Быков, О.А. Агеев. *ЖТФ*, **88** (8), 1273 (2018). <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.08.46320.2351>
- [12] R.J. Hamers, R.M. Tromp, J.E. Demuth. *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 1972 (1986). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.1972>
- [13] R.J. Hamers. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **40**, 531 (1989). <https://doi.org/10.1146/annurev.pc.40.100189.002531>
- [14] V. Dremov, V. Makarenko, S. Shapoval, O.T.V. Beshenkov, I. Khodos. *Nanobiology*, **3**, 83 (1994).
- [15] A.K. Geim, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, K.S. Novoselov, A.A. Zhukov, S.Yu. Shapoval. *Nature Mater*, **2**, 461 (2003). <https://doi.org/10.1038/nmat917>
- [16] V. Dremov, S.Y. Shapoval. *JETP Lett.*, **61**, 336 (1995).
- [17] H. Kasai, T. Kakuda, A. Okiji. *Surf. Sci.*, **363**, 428 (1996). [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(96\)00282-8](https://doi.org/10.1016/0039-6028(96)00282-8)
- [18] J.L. Costa-Krämer, N. García, H. Olin. *Phys. Rev. B*, **55**, 12910 (1997). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.12910>
- [19] K. Takayanagi. *Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology* (WORLD SCIENTIFIC, Hatoyama, Saitama, Japan, 2002), p. 205–210. https://doi.org/10.1142/9789812776716_0042
- [20] N.V. Khotkevych, Yu.A. Kolesnichenko, J.M. Van Ruitenbeek. *Low Temperature Phys.*, **38**, 503 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4723673>
- [21] J.F. Zheng, X. Liu, N. Newman, E.R. Weber, D.F. Ogletree. *Phys. Rev. Lett.*, **72**, 1490 (1994). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.1490>
- [22] S. Shapoval, V. Gurtovoi, U. Hakansson, L. Samuelson, L. Montelius. *Atomic Resolution Observation of GaAs Doped with Sn by Scanning Tunneling Microscopy* (1998)
- [23] R.M. Feenstra, G. Meyer, F. Moresco, K.H. Rieder. *Phys. Rev. B*, **66**, 165204 (2002). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.165204>
- [24] V. Gurtovoi, V. Dremov, V. Makarenko, S.Y. Shapoval. *Semiconductors*, **29**, 986 (1995).
- [25] V. Dremov, S.Y. Shapoval, V. Dremov, S.Y. Shapoval. *The ballistic emission in vacuum, in: Abstracts of IX Russian Symposium on Scanning Electron Microscopy and Analytical Methods of Solids Investigations (SEM'95) (Chernogolovka, Russia, 1995)*, p. 51.
- [26] K.S. Yeong, J.T.L. Thong, K.S. Yeong. *J. Appl. Phys.*, **100**, 114325 (2006). <https://doi.org/10.1063/1.2400722>
- [27] D. Matte, N. Chamanara, L. Gingras, L.P.R. De Cotret, T.L. Britt, B.J. Siwick, D.G. Cooke. *Phys. Rev. Research*, **3**, 013137 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.013137>
- [28] W. Cheng-Wei Huang, M. Becker, J. Beck, H. Batelaan. *New J. Phys.*, **19**, 023011 (2017). <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa58bb>
- [29] S. Li, R.R. Jones, S. Li, R.R. Jones. *THz-Induced, High-Energy Electron Emission from Tungsten Nanotips*, in: *Frontiers in Optics 2015 (OSA, San Jose, California, 2015)*, p. FM1A.3. <https://doi.org/10.1364/FIO.2015.FM1A.3>
- [30] B. Colmey, R.T. Paulino, G. Beaufort, D.G. Cooke. *Appl. Phys. Lett.*, **126**, 031108 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0238527>
- [31] W. Yu, N. Tan, K. Peng, S. Fan, Y. Fu, K. Jiang, Z. Yun, L. Wang, R. Li, Y. Du, L. Yan, C. Tang, W. Huang. *Terahertz-Driven Nano-tip Field-Emission Electron Gun and Cascaded Acceleration* (2025), <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2508.17080>
- [32] H. Yanagisawa, T. Greber, C. Hafner, J. Osterwalder. *Phys. Rev. B*, **101**, 045406 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.045406>
- [33] J. Van Laar, A. Huijser, T.L. Van Rooy. *J. Vacuum Sci. Technol.*, **14**, 894 (1977). <https://doi.org/10.1116/1.569324>
- [34] M. Leng, C.S. Lent. *Phys. Rev. B*, **50**, 10823 (1994). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.10823>
- [35] Z.X. Lim, I.A. Tayeb, Z.A.A. Hamid, M.F. Ain, A.M. Hashim, J.M. Abdullah, F. Zhao, K.Y. Cheong. *IEEE Trans. Electron Devices*, **66**, 3110 (2019). <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2915106>
- [36] X.-F. Cheng, Y. Zhao, W. Ye, C. Yu, J.-H. He, F.-Y. Wang, J.-M. Lu. *J. Mater. Chem. C*, **8**, 2964 (2020). <https://doi.org/10.1039/C9TC06948H>
- [37] M.B. Johnson, O. Albrechtsen, R.M. Feenstra, H.W.M. Salemink. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 2923 (1993). <https://doi.org/10.1063/1.110274>

- [38] M.B. Johnson, P.M. Koenraad, W.C. Van Der Vleuten, H.W.M. Salemink, J.H. Wolter. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 1606 (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.1606>
- [39] Z.F. Zheng, M.B. Salmeron, E.R. Weber. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1836 (1994). <https://doi.org/10.1063/1.111771>
- [40] T. Trappmann, C. Stürgers, H. v Löhneysen. *Europhys. Lett.*, **38**, 177 (1997). <https://doi.org/10.1209/epl/i1997-00222-0>
- [41] A.L. Saraiva, J. Salfi, J. Bocquel, B. Voisin, S. Rogge, R.B. Capaz, M.J. Calderón, B. Koiller. *Phys. Rev. B*, **93**, 045303 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.045303>
- [42] M.D. Taylor, G.C. Wetsel, S.E. McBride, R.C. Brown, W.R. Frensley, A.C. Seabaugh, Y.-C. Kao, E.A. Beam. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 3621 (1995). <https://doi.org/10.1063/1.113807>
- [43] S.Y. Shapoval, V. Gurtovoi, V. Valyaev, V. Sirotkin, I. Smirnova. *Metal nanoprobe induced electrostatic quantization in near surface delta-doped GaAs structure at 300 K*, in: Proceedings of the International Symposium „Nanostructures: Physics and Technology“ (St. Petersburg, Russia, 1997), p. 22.
- [44] D.Yu. Ivanov, S.V. Morozov, Yu.V. Dubrovskii, S.Yu. Shapoval, V.V. Valyaev, V.L. Gurtovoi. *JETP Lett.*, **66**, 737 (1997). <https://doi.org/10.1134/1.567590>
- [45] V.V. Valyaev, V.L. Gurtovoi, D.Yu. Ivanov, S.V. Morozov, V.V. Sirotkin, Yu.V. Dubrovskii, S.Yu. Shapoval, Yu.N. Khanin, E.E. Vdovin, A.N. Pustovit. *J. Exp. Theor. Phys.*, **86**, 383 (1998). <https://doi.org/10.1134/1.558440>