

07

Проявление размерного квантования на выступах шероховатой поверхности полупроводников A^3B^5

© А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, Н.Д. Жуков

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: v7021961@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 июня 2015 г.

Проведено экспериментальное исследование автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности образцов полупроводников группы A^3B^5 : InSb, InAs, GaAs. Показано, что для полупроводниковых образцов InSb и InAs наблюдаемые пики на дифференциальных туннельных ВАХ могут быть интерпретированы как проявление размерного квантования энергетического спектра электронов проводимости. Для GaAs проявления размерного квантования на дифференциальных туннельных ВАХ в условиях эксперимента выявлено не было. По результатам анализа экспериментальных данных проведена оценка характерного размера квантового объекта, сформированного на выступах шероховатой поверхности InSb и InAs.

В настоящее время исследование структур с квантово-размерными эффектами является одним из наиболее актуальных и перспективных направлений физики, техники и технологии полупроводников, поскольку напрямую связано с разработкой физических и технологических основ создания приборов и устройств наноэлектроники и оптоэлектроники. Весьма перспективными материалами в этом плане представляются полупроводниковые соединения A^3B^5 , что обусловлено особенностями их энергетического спектра и экстремально малыми значениями эффективной массы электронов проводимости. Последнее обеспечивает значение длины волны де Бройля электронов проводимости, исчисляемое десятками нанометров. В связи с этим специфические явления, связанные с размерным квантованием энергетического спектра электронов, могут проявляться в сравнительно больших по размерам структурах, например на частях выступов шероховатой поверхности полупроводниковых образцов InSb [1]. Дополнительное подтверждение

этой гипотезы можно получить, проведя аналогичные исследования для других полупроводников, относящихся к группе A^3B^5 .

Целью данной работы являлось исследование автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности образцов полупроводниковой группы A^3B^5 (InSb, InAs, GaAs) для выявления особенностей энергетического спектра электронов в этих материалах.

В работе использован метод сканирующей туннельной микроскопии шероховатой поверхности пластин n -InSb, n -InAs и n -GaAs, который позволяет исследовать автоэлектронную эмиссию из объектов с нанометровыми размерами, не прибегая к сложным технологиям создания квантово-размерных структур [2]. Исследования проводились с помощью сканирующего зондового микроскопа СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР-I по известным методикам [3].

Шероховатая структура поверхности пластин образцов получалась шлифовкой порошком корунда с размерами частиц порядка $1\ \mu\text{m}$. С целью контроля чистоты поверхности полупроводниковых образцов и выявления на ней существенных механических дефектов, а также для выбора подходящих участков в виде отдельных частей выступов микронных и субмикронных размеров проводилось предварительное исследование рельефа поверхности образцов в режиме сканирующей атомно-силовой и туннельной микроскопии. Обнаруженные значительные механические дефекты и посторонние включения на поверхности в дальнейших исследованиях избегались. Проводилось многократное экспериментальное измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) для выбранных выступов, результаты измерений усреднялись и далее обрабатывались по общепринятой методике [4].

Предварительную оценку энергетического спектра квантово-размерного объекта, получающегося на субмикронных выступах шероховатой поверхности исследуемых полупроводников, можно провести по формуле для уровней энергии электронов квантовой точки, отсчитываемой от дна зоны проводимости объемного материала [5]:

$$E(l, m, n) = \frac{(\pi\hbar)^2}{2m^*} \frac{1}{a^2} (l^2 + m^2 + n^2), \quad (1)$$

где a — характерный размер квантового объекта, выбираемый для упрощения одинаковым по всем трем пространственным координатам; l, m, n — соответствующие квантовые числа; m^* — эффективная масса электрона.

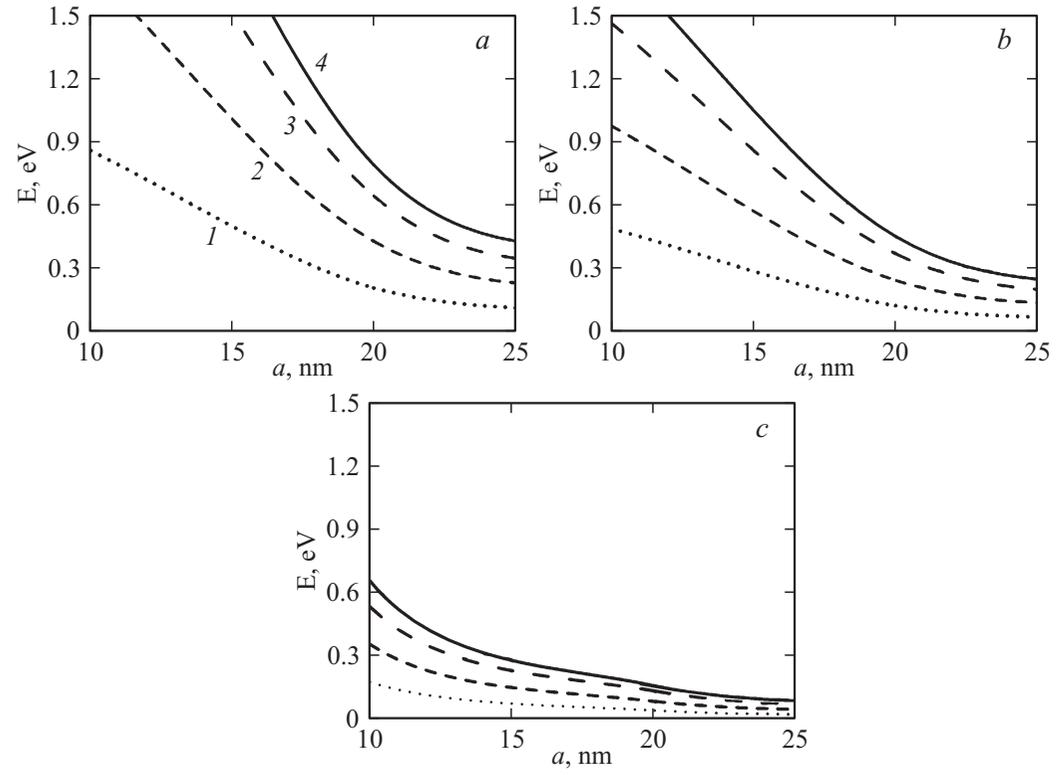


Рис. 1. Значения энергии электрона для четырех первых разрешенных уровней в зависимости от характерного размера нанобъекта a : a — InSb, b — InAs, c — GaAs.

Расчетные значения энергии электрона для первых четырех разрешенных уровней в соответствии с (1) для исследуемых полупроводников представлены на рис. 1. В расчетах использовались следующие значения эффективной массы электронов в зоне проводимости: $m^* = 0.013m_0$ для InSb; $m^* = 0.023m_0$ для InAs, $m^* = 0.063m_0$ для GaAs, где m_0 — масса свободного электрона. Как видно, при сравнимых величинах a значение энергии первого уровня и интервалы между соседними уровнями энергии для GaAs в 3–5 раз меньше, чем для InSb и InAs, и будут трудно различимы на фоне тепловых флуктуаций (значений kT), соответствующих комнатной температуре. Таким образом, предварительная оценка показывает, что заметное проявление размерного квантования для GaAs требует существенно меньших размеров квантового объекта, чем в случае InSb или InAs.

Локализованные энергетические уровни на поверхности полупроводниковых образцов и в том числе связанные со свойствами квантово-размерного объекта, формируемого на выступах шероховатой поверхности, проявляются на дифференциальных туннельных ВАХ в виде отдельных пиков [6]. Нормированная на статическую проводимость дифференциальная ВАХ, т.е. зависимость $(dI/dV)/(I/V)$ от напряжения V является более информативным инструментом [6,7]. Поэтому для анализа экспериментальных данных рассматривались нормированные дифференциальные туннельные ВАХ при отрицательном потенциале смещения на полупроводниковых образцах n -типа с соответствующим уровнем легирования (рис. 2).

Направление туннельного тока между зондом и образцом зависит от полярности прикладываемого напряжения и знака потенциала, прикладываемого к полупроводниковому образцу. В случае подачи отрицательного потенциала на полупроводниковый образец уровень Ферми образца смещается выше уровня Ферми зонда, и туннелирование электронов в зонд происходит с дискретных уровней квантово-размерного объекта, сформированного на части выступа шероховатой поверхности, на которые они попадают из объемной части образца. Таким образом, сформированный на выступах квантово-размерный объект выступает в роли своеобразного „фильтра“ для туннелирующих электронов и обуславливает пики на нормированных дифференциальных ВАХ. Следуя этим физическим модельным представлениям, можно качественно объяснить основные отличительные особенности и закономерности, получаемые при экспериментальных исследованиях, и провести неко-

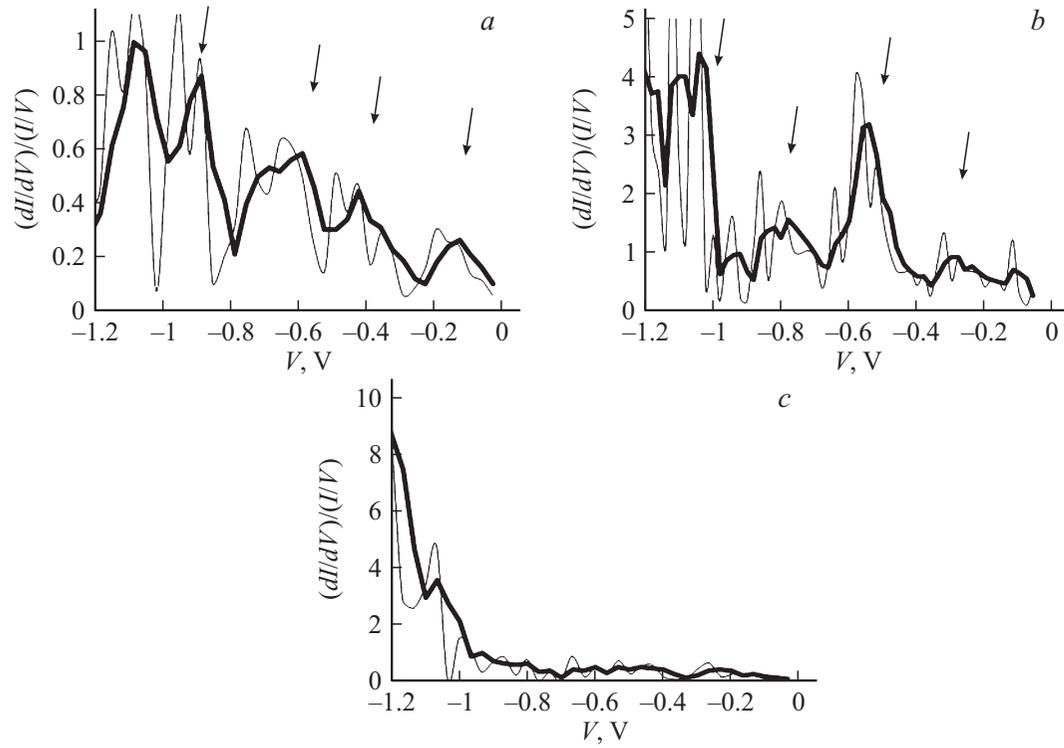


Рис. 2. Нормированные дифференциальные ВАХ: *a* — InSb, *b* — InAs, *c* — GaAs. (Утолщенная линия — линия тренда).

торые оценочные расчеты характеристик квантово-размерного объекта, разделяющего зонд и объемную часть полупроводникового образца.

На образцах InAs и InSb в исследованном интервале напряжений наблюдалось несколько пиков на нормированных дифференциальных ВАХ (на рис. 2, *a, b* указаны стрелками), которые можно связать с туннелированием электронов с поверхности полупроводникового образца в зонд через разрешенные энергетические уровни квантового объекта, сформированного на выступе шероховатой поверхности образца. Для образцов GaAs (рис. 2, *c*) с существенно меньшим значением длины волны де Бройля отчетливо наблюдался только один большой пик, связанный, по-видимому, с наличием начального обеднения поверхности электронами. Других заметных пиков с каким-либо закономерным их расположением по напряжению в экспериментах выявлено не было.

Положение первого пика в экспериментах для всех исследованных полупроводников не было вполне однозначным, поскольку оно зависит от исходного состояния поверхности полупроводника. Анализ экспериментальных данных по оценке интервалов между пиками на основании усреднения по группе образцов дал значения 0.20–0.30 V для InAs и InSb. Эти данные позволяют провести оценку величины линейных размеров квантового объекта a , формируемого при шлифовке на поверхности InAs и InSb, которая оказалась порядка 15–20 nm для обоих материалов (длина волны де Бройля для этих материалов находится в диапазоне 40–60 nm). Отсутствие заметных и закономерно расположенных пиков (кроме основного) для образцов GaAs можно связать с тем, что длина волны де Бройля для этого материала составляет не более 15 nm, и поэтому квантовые объекты с дискретным энергетическим спектром энергии электронов на шероховатой поверхности GaAs не были сформированы.

Таким образом, в данной работе на основе анализа нормированных дифференциальных туннельных ВАХ проведено экспериментальное исследование автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности образцов полупроводников группы A^3B^5 : InSb, InAs, GaAs. Показано, что для полупроводниковых образцов InSb и InAs наблюдаемые пики на дифференциальных туннельных ВАХ могут быть связаны с размерным квантованием энергетического спектра электронов, которое в этих материалах благодаря малым значениям эффективной массы электронов проводимости может экспериментально наблюдаться при комнатных температурах на достаточно простых

структурах, получаемых без использования сложных технологий. По результатам анализа экспериментальных данных удалось оценить характерный размер квантового объекта, сформированного на выступах шероховатой поверхности образцов InSb и InAs, величина которого находится в диапазоне значений от 15 до 20 nm, что вполне согласуется с известными теоретическими оценками. Для GaAs с заметно большим значением эффективной массы электронов проводимости проявления размерного квантования на дифференциальных туннельных ВАХ в условиях эксперимента отчетливо выявлено не было.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-07-00255 и 14-12-00275 Российского научного фонда и Саратовского государственного университета.

Список литературы

- [1] Михайлов А.И., Кабанов В.Ф., Жуков Н.Д. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 12. С. 8–14.
- [2] Жуков Н.Д., Глуховской Е.Г. // Нанотехника. 2014. В. 2. С. 127–131.
- [3] Сканирующий зондовый микроскоп. НАНОЭДЬЮКАТОР-I: Руководство по эксплуатации. 2012. Copyright © „НТ-МДТ“. <http://www.ntmdt.ru>
- [4] Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. / Российская академия наук. Институт физики микроструктур. Нижний Новгород, 2004. 110 с.
- [5] Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: Учебное пособие. М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. 496 с.
- [6] Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела: Учебное пособие / В.И. Троян, М.А. Пушкин, В.Д. Борман, В.Н. Тронин; под ред. В.Д. Бормана: М.: МИФИ, 2008. 260 с.
- [7] Демиховский В.Я., Филатов Д.О. Исследование электронных состояний в низкоразмерных структурах методами сканирующей зондовой микроскопии: Учебно-методический материал по программе повышения квалификации „Физико-химические основы нанотехнологий“. Нижний Новгород, 2007. 77 с.