

08

Термоавтоэлектронная эмиссия из квантовых точек антимионда индия

© В.Ф. Кабанов, А.И. Михайлов, М.В. Гавриков[¶]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

[¶] E-mail: maks.gavrikov.96@gmail.com

Поступило в Редакцию 18 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 29 декабря 2020 г.

Принято к публикации 25 января 2021 г.

Выявлены и проанализированы особенности механизма автоэлектронной эмиссии в системе зонд туннельного микроскопа–квантовая точка антимионда индия в температурном диапазоне 23–150°C. Анализ туннельных вольт-амперных характеристик позволил сделать вывод о различных механизмах переноса электронов из металлического зонда туннельного микроскопа и полевой эмиссии электронов через дискретные энергетические уровни квантовой точки антимионда индия при различных температурах.

Ключевые слова: квантовые точки, антимионд индия, автоэлектронная эмиссия, туннельные вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50854.18662

Интерес к исследованиям автоэлектронной эмиссии вызван развитием нано- и микроэлектроники. В условиях реальной работы электронных и оптоэлектронных устройств и приборов с квантово-размерными объектами (ямами и точками) процессы автоэлектронной эмиссии проходят совместно с тепловыми. Термоавтоэлектронная эмиссия определяется и процессами туннелирования, и процессами их теплового возбуждения. При некоторой температуре $T > 0^\circ\text{C}$ часть электронов находится на уровнях энергии больше $\varepsilon = (3/2)kT$ (возбужденные электроны). Для возбужденных электронов потенциальный барьер становится ниже, что увеличивает коэффициент их прохождения через барьер.

Одними из наиболее потенциально востребованных с точки зрения уникальных свойств и перспективы практических приложений [1] являются антимионд индия и структуры с квантовыми точками на его основе.

В настоящей работе проведены исследования автоэлектронной эмиссии электронов в системе зонд туннельного микроскопа–квантовые точки (КТ) антимионда индия при различных температурах.

Коллоидный синтез квантовых точек InSb проводился согласно методике, описанной в [2,3].

Слой с КТ InSb были нанесены на стеклянные подложки с проводящим слоем оксида индия-олова (ITO) и исследованы с помощью методов сканирующей туннельной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Для понимания и интерпретаций процессов токопере-носа в исследуемых образцах привлекались модельные представления туннелирования электронов через дискретные уровни квантово-размерного объекта в структуре [4–6]. Типичное ПЭМ-изображение исследуемых наночастиц InSb представлено на рис. 1. Для даль-

нейшего анализа привлекалась модель представления наночастицы как квантовой точки.

Важным для понимания электронных процессов в рассматриваемых КТ, а также эффекта туннелирования электронов через уровни КТ является анализ модельных представлений термоэлектронной эмиссии из зонда туннельного микроскопа через КТ в металлический контакт ИТО (отрицательное смещение на зонде) и обратно в зонд (положительное смещение на зонде). Выбор модели термополевой эмиссии в качестве основного в рассматриваемой системе механизма переноса электронов обусловлен тем, что расстояние между КТ и зондом вы-

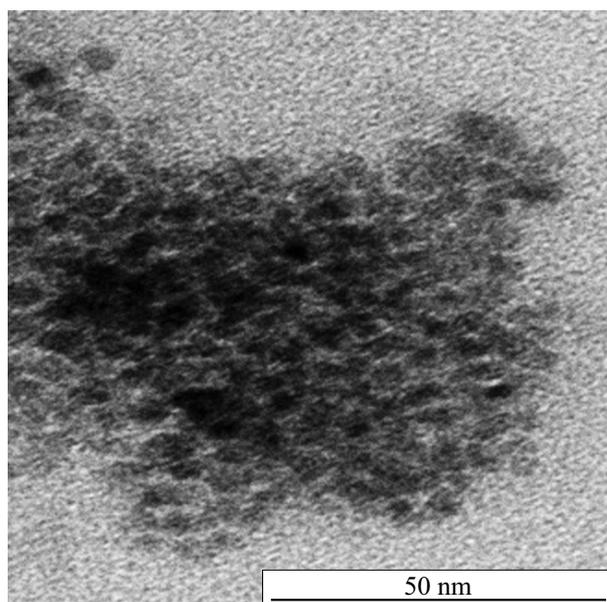


Рис. 1. Типичное ПЭМ-изображение КТ InSb.

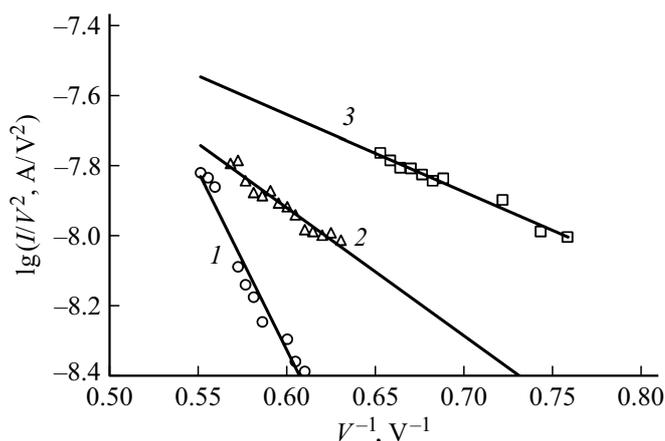


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики КТ InSb (положительное смещение на образце) в координатах $\lg(I/V^2) - V^{-1}$. T , °C: 1 — 23, 2 — 90, 3 — 150.

биралось порядка 1 nm и напряженность электрического поля по оценке составляла величину более $5 \cdot 10^6$ V/cm.

Степень прозрачности потенциального барьера определяет вероятность туннелирования электрона, попадающего на барьер, и соответственно значения плотности тока термоэлектронной эмиссии. Вероятность туннелирования электрона сквозь потенциальный барьер определяется по известной формуле [7]:

$$W(\varepsilon) \approx \exp\left(-\frac{4\pi}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m_0(U(x) - \varepsilon)} dx\right), \quad (1)$$

где $U(x)$ и ε — соответственно потенциальная и полная энергия электрона; x_1 и x_2 являются решениями уравнения $\varepsilon = U(x)$ и определяют энергетический интервал, в котором происходят обозначенные процессы.

Вероятность туннелирования $W(\varepsilon)$ увеличивается при повышении энергии ε электрона, например, с ростом общей температуры системы. Это должно сказываться на эффективной высоте барьера и величине туннельного потока электронов из зонда туннельного микроскопа через дискретные уровни КТ в металлический контакт (ИТО). При обратной полярности приложенного напряжения полевая эмиссия электронов осуществляется через уровни КТ (при соответствующем смещении $qV = \varepsilon_i$, где ε_i — i -й дискретный энергетический уровень КТ [4], q — модуль заряда электрона, V — напряжение). Величина ε_1 первого уровня КТ InSb (через который в основном и реализуется механизм туннелирования) при характерных размерах порядка 8 nm (рис. 1) составляет величину около 1.0 eV. В этом случае увеличение температуры на несколько десятков градусов от комнатной соответствует изменению энергии не более чем на 0.01 eV, что практически не должно сказываться на механизме полевой эмиссии электронов через уровни КТ в зонд микроскопа. Величина эффективного энергетического барьера для электронов,

эмитированных из ИТО, определяется приложенным к структуре напряжением и практически не зависит от температуры (вклад менее 1%).

В работе проводились измерения туннельных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в системе зонд микроскопа–воздушный зазор (туннельно-тонкий порядка 1 nm)–КТ (характерный размер порядка 8–10 nm)–ИТО (металлический электрод) при температурах 23, 90 и 150 °C.

Результаты измерений при положительном смещении на образце (эмиссия электронов из зонда) представлены на рис. 2.

Эти экспериментальные данные показывают, что с ростом температуры возрастает величина тока автоэлектронной эмиссии и, что существенно важно, изменяется наклон характеристики в координатах Фаулера–Нордгейма. Последнее свидетельствует об изменении эффективной высоты потенциального барьера и увеличении вероятности туннелирования через барьер, связанного с возрастанием энергии электронов при нагревании системы.

Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля (и соответственно приложенного напряжения) при рассмотрении автоэлектронной эмиссии из полупроводника [8] может быть представлена следующим образом:

$$j_s \sim \exp\left(-\frac{\theta}{E}\right), \quad (2)$$

где θ — значение функции Нордгейма, E — напряженность электрического поля. Локальную напряженность электрического поля в одномерном приближении можно оценить по формуле $E = V/d$, где V — приложенное напряжение, d — расстояние между КТ и зондом.

Для подтверждения описанного выше механизма автоэлектронной эмиссии были проведены исследования туннельных ВАХ при отрицательном смещении на образце. Результаты представлены на рис. 3.

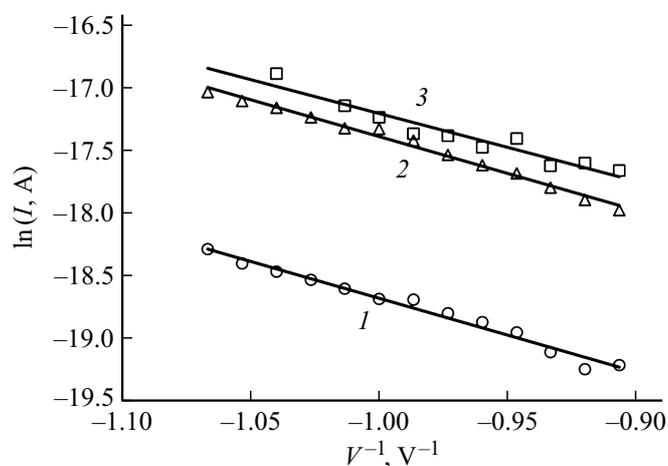


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики КТ InSb (отрицательное смещение на образце) в координатах $\ln I - V^{-1}$. T , °C: 1 — 23, 2 — 90, 3 — 150.

Эти экспериментальные результаты показывают довольно хорошую линейность зависимостей в рассматриваемом диапазоне напряжений в указанных координатах в соответствии с (2). Сохранение угла наклона зависимостей при различных температурах позволяет считать, что механизм наблюдавшегося тока термоавтоэлектронной эмиссии через дискретные энергетические уровни квантовой точки может быть удовлетворительно описан в соответствии с подходами, сформулированными в настоящей работе. Проведенная оценка величины функции Нордгейма θ , учитывающей понижение потенциального барьера, для КТ InSb дает значение порядка $(0.16-0.17) \cdot 10^{-1}$, что хорошо коррелирует с результатами [2].

В настоящей работе на основе экспериментально полученных туннельных ВАХ проведено исследование и получена теоретическая оценка некоторых параметров, характеризующих физический механизм термоэлектронной эмиссии в системе зонд туннельного микроскопа—квантовая точка антимонида индия при различных температурах. Наблюдавшееся изменение наклона ВАХ в координатах Фаулера—Нордгейма (эмиссия электронов из зонда) свидетельствует об изменении эффективной высоты потенциального барьера, связанного с повышением энергии электронов при нагревании системы. Линейность ВАХ (при эмиссии электронов из КТ) и сохранение угла наклона при различных температурах позволяют считать, что механизм наблюдавшегося тока термоавтоэлектронной эмиссии через квантовую точку антимонида индия адекватно описывается теорией Моргулиса—Стрэттона в диапазоне значений напряженности электрического поля, соответствующем условиям экспериментов.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 19-07-00087 и 19-07-00086.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, Н.Д. Жуков, Письма в ЖТФ, **41** (12), 8 (2015).
[Пер. версия: 10.1134/S1063785015060267].
- [2] W. Liu, A.Y. Chang, R.D. Schaller, D.V. Talapin, J. Am. Chem. Soc., **134** (50), 20258 (2012). DOI: 10.1021/ja309821j
- [3] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, М.В. Гавриков, Письма в ЖТФ, **46** (7), 36 (2020).
DOI: 10.21883/PJTF.2020.07.49218.18145 [Пер. версия: 10.1134/S1063785020040100].
- [4] A.I. Mikhailov, V.F. Kabanov, E.G. Glukhovskoy, M.I. Shishkin, M.V. Gavrikov, Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, **9** (4), 464 (2018).
DOI: 10.17586/2220-8054-2018-9-4-464-467
- [5] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, И.А. Горбачев, Е.Г. Глуховской, ФТП, **52** (6), 603 (2018).
DOI: 10.21883/FTF.2018.06.45923.8443 [Пер. версия: 10.1134/S1063782618060155].
- [6] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, И.А. Горбачев, А.В. Казак, Н.В. Усольцева, Е.Г. Глуховской, Изв. РАН. Сер. физ., **81** (12), 1668 (2017).
- [7] Л.Л. Гольдин, Г.И. Новикова, *Квантовая физика. Вводный курс* (Ин-т компьютерных исследований, М., 2002).
- [8] Н.В. Егоров, Е.П. Шешин, *Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы* (Интеллект, Долгопрудный, 2011).