

13

Особенности автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности антимонида индия

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

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

Поступило в Редакцию 30 декабря 2014 г.

Проведено исследование механизмов автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности образцов полупроводника InSb. Показано, что механизм тока автоэлектронной эмиссии удовлетворительно описывается теорией Моргулиса–Стрэттона. Интерпретация полученных зависимостей дала возможность считать, что наблюдался эффект низкополевой автоэлектронной эмиссии. Анализ экспериментально полученных туннельных спектров позволил идентифицировать пики зависимости коэффициента нелинейности ВАХ как проявление особенностей энергетического спектра квантово-размерного объекта.

Интерес к исследованиям автоэлектронной (полевой) эмиссии вызван развитием наноэлектроники и вакуумной микроэлектроники. В настоящее время хорошо изучена автоэмиссия из катодов макроскопических размеров, включающих в свою структуру множество нано- и микроострий [1]. Для получения катодов с перспективными для применения свойствами важным представляется значительное снижение величин напряженности электрического поля, требуемого для автоэмиссии, т. е. эффект низкополевой эмиссии, о возможности которого сообщалось в работе [2].

В данной работе исследована полевая эмиссия электронов из субмикронных выступов шероховатой поверхности узкозонного полупроводника — антимонида индия (InSb), представляющего теоретический и практический интерес в связи с экстремально малыми значениями эффективной массы электрона $m^* = 0.0013m_0$, где m_0 — масса свободного электрона, и высоким значением подвижности электронов. Поэтому длина волны де Бройля для электрона в зоне проводимости для этого материала имеет наибольшие значения для полупроводников, достигая

десятков нанометров, и специфические явления, связанные с размерным квантованием энергетического спектра электронов, могут проявляться в сравнительно больших по размерам структурах, например на частях выступов шероховатой поверхности.

В работе использован метод туннельной микроскопии шероховатой поверхности пластин, который позволяет исследовать полевую эмиссию электронов из объектов с нанометровыми размерами, не прибегая к сложным технологиям создания плоскостных структур [3]. Исследования проводились с помощью сканирующего зондового микроскопа СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР-I по известным методикам [4].

Шероховатая структура поверхности пластин образцов создавалась шлифовкой порошком корунда с размерами частиц 1–3 мкм. Исследования рельефа поверхности образцов проводились в режиме сканирующей атомно-силовой и туннельной микроскопии с целью контроля чистоты и значительных механических повреждений, а также для выбора на поверхности образцов подходящих участков в виде отдельных частей выступов микронных и субмикронных размеров. Механические дефекты и посторонние включения на поверхности идентифицировались по контрастно-цветовым различиям и в дальнейших исследованиях избегались. Зазор между зондом и выбранным выступом устанавливался порядка 10 нм. Результаты измерений усреднялись и далее обрабатывались по общепринятой методике [5].

Для интерпретации экспериментальных результатов ВАХ использовались представления об автоэмиссии электронов из металла в вакуум по теории Фаулера–Нордгейма, в соответствии с которой плотность тока автоэмиссии определяется формулой [1]

$$j_m = \frac{q^3 E^2}{8\pi h A_m^3 t^2} e^{-\frac{8\pi\sqrt{2m_0 A_m^3}}{3hqE} \theta} \quad (1)$$

и для автоэмиссии из полупроводников по теории Моргулиса–Стрэттона [1]

$$j_s = qn_0 \left(\frac{kT}{2\pi m_0} \right)^{1/2} e^{-\frac{8\pi\sqrt{2m_0 A_s^3}}{3hqE} \theta}, \quad (2)$$

где m_0 — масса электрона, θ — значения функции Нордгейма, A_m , A_s — работа выхода электронов из металла и полупроводника соответственно, E — локальная напряженность электрического поля, t — специальная функция, учитывающая влияние на величину тока степени

понижения треугольного потенциального барьера (для практических расчетов значение t можно принять равным 1 [6]), n_0 — концентрация электронов в объеме полупроводника, q — модуль заряда электрона.

Для проведения численной оценки значений плотности тока локальная напряженность электрического поля определялась как $E = \beta V$, где V — приложенное напряжение; β — коэффициент пропорциональности, который зависит от формы и размеров системы катод–анод (в работе расчет проводился для острейного автоэммиттера в форме параболоида вращения) [6]: $\beta = 2/(r \ln(2d/r))$, где d — размер зазора анод–катод; r определяется в основном не макроскопическим радиусом кривизны кончика острия, а его атомарной структурой, т.е. на кончике зонда с большой вероятностью находится один выступающий атом или небольшой кластер атомов [5]. Значение тока можно приближенно оценить по формуле $I = j2\pi r^2$.

Экспериментальные ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма для эмиссии из вольфрамового зонда (отрицательный потенциал на зонде) приведены на рис. 1, *a*. На рис. 1, *b* приведены результаты расчета в соответствии с выражением (1) для эмиссии из вольфрамового острия при следующих параметрах: $A_m = 4.5$ eV, $t = 1$, величина θ выбиралась в интервале от 0.9 до 0.7, эффективное значение r варьировалось в пределах от 1 до 10 nm. Видно, что подбором параметров (находящихся в разумных диапазонах значений) можно получить не только качественное, но и удовлетворительное количественное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

При положительном смещении на зонде (отрицательный потенциал на полупроводнике) осуществлялась эмиссия электронов из выступов на поверхности полупроводника, являющихся по своей природе нано-объектами (размер острия эмиссии мог достигать 10–20 nm). Типичные экспериментальные данные для различных образцов представлены на рис. 2, *a*. Расчетные значения ВАХ в соответствии с выражением (2) приведены на рис. 2, *b*. Коэффициент пропорциональности β определялся из экспериментальных данных при выборе соответствующего значения θ (для эмиссии из металла существенно больше, чем для эмиссии из полупроводника), $A_s = 5$ eV. При сравнении с расчетными данными величина β оказалась близкой к расчетной для случая эмиссии из металла и на порядок величины меньше для случая эмиссии из полупроводника. Этот результат позволяет считать, что в условиях эксперимента наблюдался эффект низкополевой эмиссии.

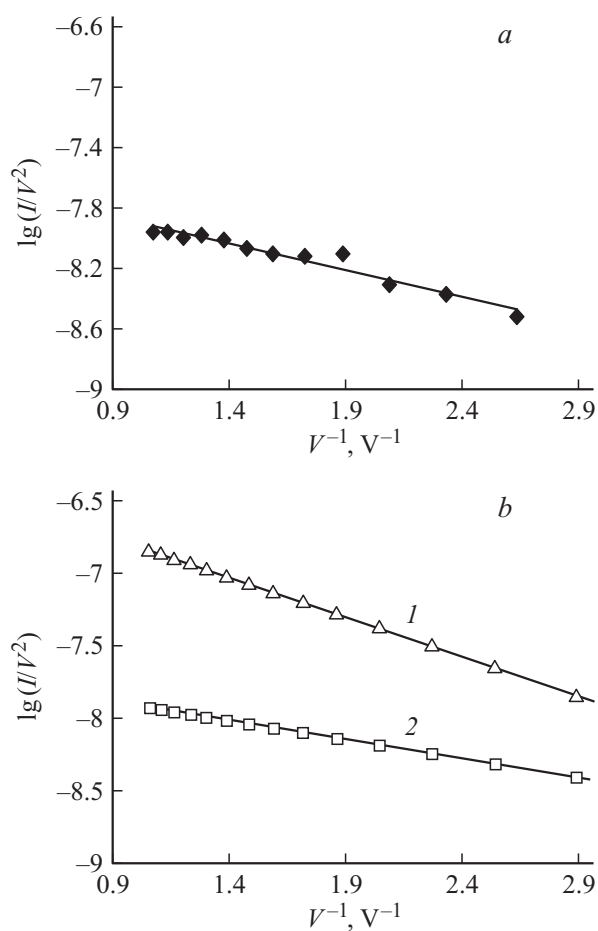


Рис. 1. ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма $\lg(I/V^2)$ от V^{-1} : *a* — экспериментальная (прямая — линия линейного тренда), *b* — расчетная, при $\theta = 0.8$ (1), $\theta = 0.9$ (2).

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента нелинейности ВАХ $(dI/dV)/(I/V)$ от напряжения V . Как видно, на данной зависимости наблюдаются основной пик в интервале напряжений от 0 до -1 В и множество слабо выраженных пиков в интервале от -1

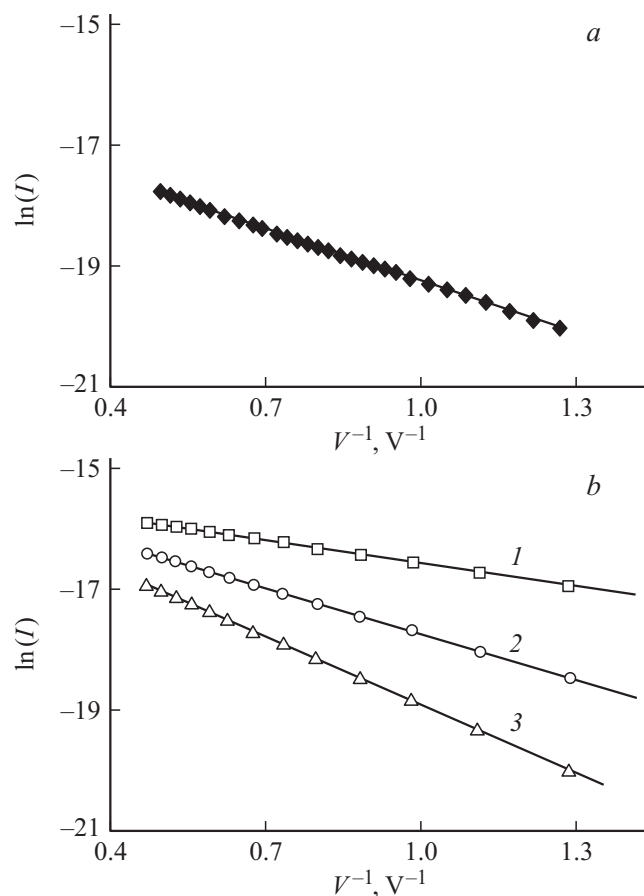


Рис. 2. ВАХ в координатах $\ln(I)$ от V^{-1} : *a* — экспериментальная (прямая — линия линейного тренда), *b* — расчетная, при $\theta = 0.01$ (1), $\theta = 0.02$ (2), $\theta = 0.03$ (3).

до -4 В. Наличие основного (№ 1) и некоторых выделенных нами пиков (№ 2, 3 и 4 на рис 3, *b*), указывает на то, что эмиссия электронов из полупроводника происходит с участием (одного или нескольких) квантованных уровней энергии электронов в приповерхностной зоне материала — в частях выступов шероховатой поверхности, обращенных

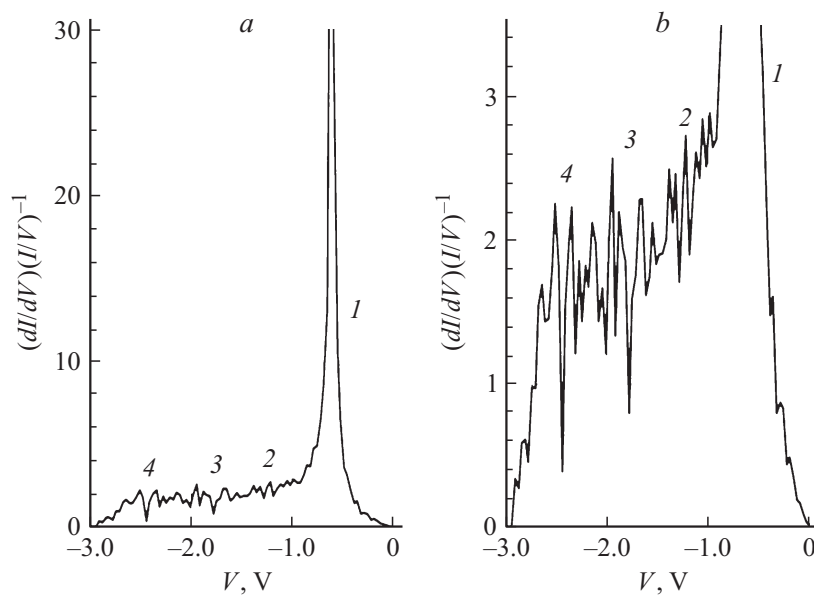


Рис. 3. Зависимость коэффициента нелинейности ВАХ $(dI/dV)/(I/V)$ от V .

к зонду. Очевидно, положение основного пика определяется величиной ширины запрещенной зоны полупроводника и положением уровня Ферми, а также возможным начальным искривлением зон вблизи поверхности, соответствующим режиму обогащения поверхности полупроводника электронами. Интервал по напряжению между пиками 2 и 1, пиками 3 и 2 и пиками 4 и 3 в экспериментах получался примерно равным 0.6–0.7 В. Если предположить, что данные пики обусловлены дискретными уровнями энергии электронов в квантовой точке, образованной частями выступов шероховатой поверхности, то можно оценить линейные размеры таких квантовых точек [7]. По этим оценкам они оказываются в интервале от 10 до 20 нм, что вполне согласуется с аналитическими оценками для InSb. Таким образом, квантовая точка, образованная частью выступа шероховатой поверхности полупроводника, выполняет функцию своеобразного „фильтра“ для эмиссионного потока электронов из полупроводника в вакуум и далее к зонду туннельного микроскопа.

Таким образом, в данной работе проведено экспериментальное исследование и соответствующий теоретический анализ возможных механизмов автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой шлифованной поверхности образцов полупроводника InSb, полученных без использования сложной технологии создания наноструктурированных объектов. Показано, что механизм наблюдавшегося тока автоэлектронной эмиссии из полупроводника удовлетворительно описывается теорией Моргулиса–Стрэттона в диапазоне значений напряженности электрического поля, соответствующем условиям экспериментов. Анализ ВАХ позволяет считать, что в условиях эксперимента наблюдался эффект низкополевой автоэлектронной эмиссии из полупроводника, а пики на туннельных спектрах связаны с особенностями энергетического спектра квантово-размерного объекта, сформированного на вершинах выступов шероховатой поверхности полупроводника.

Авторы благодарят профессора И.И. Засавицкого (ФИ РАН) за консультации и предоставленные полупроводниковые образцы, а также сотрудников Саратовского госуниверситета Е.Г. Глуховского и Д.Н. Братшова — за измерения на сканирующем зондовом микроскопе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-07-00255.

Список литературы

- [1] *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. М.: Интеллект, 2011. 704 с.
- [2] *Стеценко Б.В.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 4. С. 152–154.
- [3] *Жуков Н.Д., Глуховской Е.Г.* // Нанотехника. 2014. В. 2. С. 127–131.
- [4] Сканирующий зондовый микроскоп. НАНОЭДЬЮКАТОР-I: Руководство по эксплуатации. 2012. Copyright © „НТ-МДТ“. <http://www.ntmdt.ru>
- [5] *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. Российская академия наук. Институт физики микроструктур. Нижний Новгород, 2004. 110 с.
- [6] *Кузьменко А.П., Кузько А.Е., Тимаков Д.И.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 2. С. 91–96.
- [7] *Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А.* Основы наноэлектроники: Учебное пособие. М.: Университетская книга; Логос; Физматкнига, 2006. 496 с.