

МОДЕЛИРОВАНИЕ АРТЕФАКТОВ НА ВАХ РЕЗОНАНСНО-ТУННельНОГО ДИОДА

Москалюк В. А., Федяй А. В.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
пр. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина
тел.: 044-4549064, e-mail: artem.fedyay@gmail.com

Аннотация — В рамках формализма волновых функций предложен оригинальный метод учета артефактов на ВАХ резонансно-туннельного диода (РТД), происхождение которых долгое время было предметом дискуссии. В настоящей работе их происхождение трактуется как токоперенос между квазилокализованными состояниями в эмиттерной квантовой яме (ЭКЯ) и основной квантовой яме (ОКЯ). Сам метод учета состоит во введении виртуального резервуара, из которого электроны могут туннелировать через потенциальный барьер, моделирующий рассеивание в ЭКЯ, а затем через двухбарьерную квантовую систему. Метод включен в разработанное авторами приложение для моделирования квантового транспорта, имеющее графический интерфейс пользователя.

I. Введение

Резонансно-туннельный диод — наиболее высокочастотный компонент твердотельной электроники. Недавно с помощью РТД на основе GaInAs/AlAs удалось достичь генерации на частотах 1 ТГц [1] при комнатной температуре. Сделано это было благодаря выполнению области эмиттерного спейсера в виде ступенчатой варизонной структуры.

В то же время в [2] было получено экспериментальное доказательство того, что метастабильные состояния в квазиреугольной ЭКЯ ответственны за образования артефактов (визуально это одна или несколько областей «плато»), которые наблюдаются на ВАХ правее пикового смещения, где известные модели предсказывают монотонное резкое уменьшения тока с ростом напряжения вплоть до «долины» ВАХ. Пример ВАХ РТД из [3] с артефактом показан на рис. 1. В этой же области может наблюдаться гистерезис ВАХ, происхождение которого в данной работе не обсуждается.

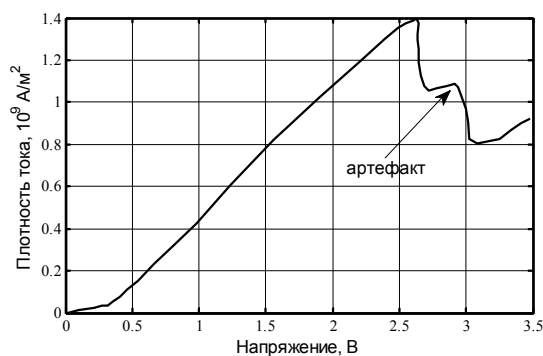


Рис. 1. ВАХ РТД (i) адаптированная из [3] при $T=77$ К.

Fig. 1. I-V characteristics of RTD (i) adapted from [3]

Происхождение артефактов было и остается предметом дискуссии: высказывались мнения о том, что они связаны с внутренней [4] или внешней [5] бистабильностью, и даже с Г-Х-Г переносом в рамках двухдолинной модели [6].

С выяснением истинной природы артефактов появилась возможность их реального предсказания в рамках моделей РТД, построенных на тех или иных формализмах.

В [7] авторами этой работы было описано разработанное приложение для моделирования квантового транспорта в слоистых наноструктурах типа РТД. Приложение реализовано в среде *MatLab*, оснащено графическим интерфейсом пользователя и способно моделировать статические характеристики РТД в одно- и двухдолинном приближении. Модель, на основе которой построено приложение, создана в рамках формализма волновых функций. В отличие от [6] не было введено понятие поверхностного заряда, но спейсеры были отнесены к «квантовой» области и накопление заряда учитывалось по всей длине спейсера с учетом эффектов размерного квантования. Таким образом, стало возможным рассматривать накопление электронов в квазилокализованных состояниях в ЭКЯ, которая формируется в спейсере.

Однако электроны из эмиттера не проникали в ЭКЯ, потому что их движение в области спейсеров считалось баллистическим, а чтобы попасть в область ЭКЯ необходимо испытать акт неупругого рассеяния.

В данной работе описан прием, который позволяет смоделировать процессы рассеяния электронов в ЭКЯ и, таким образом, предсказать артефакты на ВАХ.

II. Описание метода

Для учета переноса заряда между квазидвумерным электронным газом в ЭКЯ и ОКЯ был предложен следующий метод. При энергиях ниже дна зоны проводимости в эмиттере, но выше дна ЭКЯ вводился виртуальный «резервуар», который поставлял электроны через барьер, моделирующий интенсивность рассеяния. Дно «резервуара» совпадает с дном ЭКЯ. Высоту и ширину этого барьера можно подобрать так, чтобы получить реалистичные значения плотности тока. Электроны в нем находятся в термодинамическом равновесии с эмиттером (рис. 1).

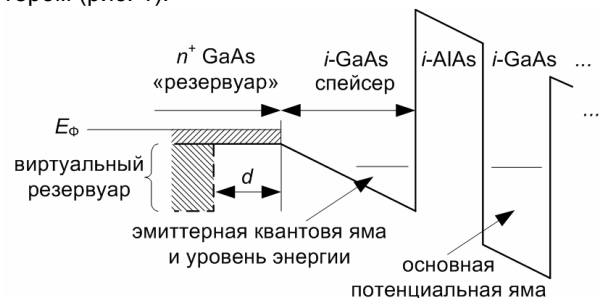


Рис. 2. Рельеф зоны проводимости (сплошная линия). Штриховая линия – виртуальный резервуар и барьер.

Fig. 2. Conduction band profile (the solid line). The dashed line denotes a virtual reservoir and a barrier

Модели, основанные на формализме волновых функций, не в состоянии описывать процессы неупругого рассеяния в метастабильные состояния прин-

ципально. Мы, однако, отталкивались от сути явлений, которые должны наблюдаться при неупругом рассеянии электронов в ЭКЯ. Во-первых, электроны должны накапливаться на метастабильных уровнях энергии, ширина которых зависит от скорости неупругого рассеяния в них и от скорости утечки через барьер справа. Во-вторых, электроны должны создавать ток. Часть электронов, прошедшая барьер, шириной d на рис. 1, моделирует процесс рассеяния в ЭКЯ. Если при данной энергии найти вероятность прохождения всей квантовой системы, начиная с виртуального «резервуара», то можно вычислить ток, который создают электроны, рассеянные в ЭКЯ. Какая бы ни была ширина барьера d , метастабильные уровни будут всегда иметь одну и ту же энергию: изменяться будет лишь их уширение, которое обратно пропорционально скорости неупругого рассеяния. Таким образом, меняя d , мы моделируем изменение скорости неупругого рассеяния в ЭКЯ.

Численные эксперименты показали, что при совпадении уровня энергии в ЭКЯ и ОКЯ наблюдается характерная область «плато» на ВАХ, которая может быть «растянута» по напряжению из-за того, что в определенном интервале напряжений уровни энергии в ЭКЯ и ОКЯ опускаются почти синхронно.

На рис. 3 показана рассчитанная ВАХ для РТД с параметрами из [3]. Мы использовали однодолинное приближение; самосогласование не производилось; рассеяние учитывалось в квантовой яме и в ЭКЯ. Результаты моделирования ВАХ позволяют качественно предсказать появление области плато на ВАХ, однако напряжение пика ниже экспериментального [3] из-за отсутствия самосогласования и неучета большого паразитного сопротивления изменяемых диодов. Ток ниже, предположительно, из-за пренебрежения Г-Х-Г транспортом.

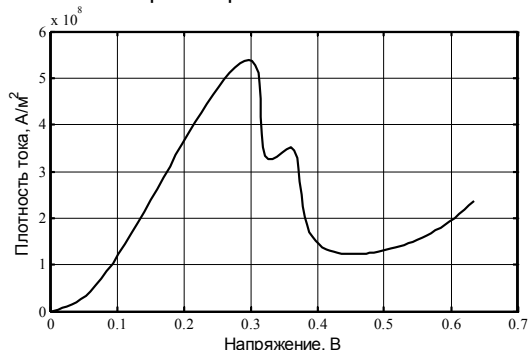


Рис. 3. Численное моделирование ВАХ РТД из [7].

Fig. 3. Calculated RTD I-V characteristics from [7]

III. Заключение

Предложен метод, который позволяет описать токоперенос между эмиттерной и основной квантовой ямой в резонансно-туннельном диоде в рамках формализма волновых функций. Метод отражает реальную физическую картину происходящих процессов и, как показала предварительная верификация, позволяет предсказать наличие артефактов на ВАХ РТД. Сравнение с экспериментальными данными показывает перспективность дальнейшего развития такого подхода. С помощью указанного метода можно проводить реалистичное моделирование той части ВАХ РТД, к которой очень чувствительны функциональные свойства диода. Модель можно использовать при разработке топологии РТД с большей контрастностью ВАХ для повышения быстродействия.

Метод дополняет ранее созданную авторами модель [7], реализованную в среде *MatLab* и имеющую графический интерфейс пользователя.

V. Список литературы

- [1] *Fundamental* oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature / S. Suzuki et. al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. P. 242102.
- [2] *Experimental* verification of origin of plateau-like current-voltage characteristics of resonant tunneling diodes / Z. J. Qiu et. al. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 84. P. 1961—1963.
- [3] *The design* of GaAs/AlAs resonant tunneling diodes with peak current densities over 2×10^8 A cm⁻² / E. Wolak et. al. // *J. Appl. Phys.* 1991. Vol. 69. P. 3345—3350.
- [4] *Goldman V. J. et. al.* Observation of intrinsic bistability in resonant tunneling structures // *Phys. Rev. Lett.* 1987. Vol. 58. P. 1256-1259.
- [5] *Effect* of circuit oscillations on dc current-voltage characteristics of double barrier resonant tunneling structures / J. F. Young et. al. // *Appl. Phys. Lett.* 1988. Vol. 52. P. 1398.
- [6] *Комбинированная* двухзонная модель резонансно-туннельного диода / И. И. Абрамов и др. // *Физика и техника полупроводников.* 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1395—1400.
- [7] *Москалюк В. О., Федяй А. В., Ярошенко О. Ю.* Прикладна програма для моделювання переносу заряду в квантоворозмірних гетероструктурах з графічним інтерфейсом користувача // *Н.-техн. журнал «Електроніка і зв'язь», тематический випуск «Електроніка і нанотехнології».* 2011. № 1. С. 48—53.

MODELING OF ARTIFACTS AT THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE RESONANT TUNNELING DIODE

Moskaliuk V. A., Fedyay A. V.

NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"

GSP-105, 37, Pobedy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

Ph.: 044-4549064, e-mail: artem.fedyay@gmail.com

Abstract — The method of accounting of artifacts at I-V characteristics of a resonant tunneling diode (RTD) was proposed within envelope function formalism. The idea of a method is to introduce a "virtual" reservoir that can emit an electron through a definite barrier to the emitter quantum well (EQW), from which electrons can tunnel through the main quantum well (MQW) through the whole quantum region.

I. Introduction

The experimental evidence of origin of artifacts at the I-V characteristics was obtained in [2] and attributed to electron tunneling from EQW to MQW. There was a principle problem in envelope function models to take into account such kind of transport. We propose a method that allows circumventing such a problem in a way that is naturally harmonized with envelope function formalism.

II Main Part

Instead of the treatment of inelastic scattering due to which electrons can scatter into the EQW we propose to introduce a reservoir, which models scattered electrons. The bottom of such reservoir is aligned with the bottom of the EQW, from which it is separated by a definite barrier. Thus, electrons can pass to EQW from the virtual reservoir so as if they were scattered to EQW from overlying energy levels. The comparison with experimental data is fulfilled to demonstrate abilities of a model.

IV. Conclusion

Proposed method allows describing EQW-MQW transport conceptually simply. It is based on the real and experimentally confirmed physical background. The model can be used to improve characteristics of RTD due to more adequate modeling of the most important region in the I-V characteristics.