

УПРАВЛЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТРЕХ СВЯЗАННЫХ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Кальфа А. А., Крюков А. Р., Тагер А. С.

Экспериментально продемонстрирована возможность управления вольт-амперной характеристикой (ВАХ) трех связанных копланарных резонансно-туннельных диодов (РТД), изготовленных в едином технологическом процессе из одной двухбарьерной гетероструктуры на полуизолирующей подложке. Изменением напряжения на одном из РТД удавалось выравнивать высоту резонансных пиков на ВАХ двух других диодов, соединенных последовательно. Это важно при использовании РТД в ячейках многоуровневой логики. Дана физическая интерпретация эффекта.

Введение. Интерес к резонансно-туннельным диодам (РТД) и транзисторам во многом связан с особенностями их вольт-амперных характеристик (ВАХ), которые могут обладать участками отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) или отрицательной крутизны (см. обзоры [1, 2]). Используя горизонтальную [3] или вертикальную [4] интеграцию РТД, удастся создать приборы с ВАХ, на которой имеется несколько участков ОДП и соответственно несколько резонансных пиков. На их основе можно, в частности, строить монокристаллические ячейки многоуровневой логики с высоким быстродействием [5].

Для ряда применений представляется важным электрическое управление формой ВАХ. Далее мы покажем, что такое управление может быть осуществлено в системе трех связанных копланарных РТД, изготовленных на основе одной двухбарьерной несимметричной гетероструктуры. При этом два диода соединялись последовательно навстречу друг другу (на одном — контакт истока, а на другом — стока), а на третий (затвор) подавался управляющий потенциал. Изменением последнего можно было управлять формой ВАХ с двумя резонансными пиками, изменяя высоту этих пиков и расстояние между ними.

Таким образом, с помощью одинаковых РТД, изготовленных на одной гетероструктуре, формировался аналог резонансно-туннельного транзистора с двухбарьерными структурами в областях истока, стока и затвора, ВАХ имела два резонансных пика одинаковой высоты. С помощью подобного прибора можно реализовать элемент трехуровневой логики, обладающий высоким быстродействием.

1. Экспериментальные образцы

Двухбарьерные гетероструктуры, описанные ранее [6], выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках. Они состояли из потенциальной GaAs-ямы шириной 4.5 нм, двух симметричных AlAs-барьеров (2 нм), к которым примыкали нелегированные участки («спейсеры») из GaAs (14 нм). За ними следовали слои GaAs с плавным возрастанием концентрации доноров N_D от $2 \cdot 10^{17}$ до $2 \cdot 10^{18}$ см⁻³ и сильно легированные контактные слои GaAs (1.5 мкм), нижний из которых примыкал к подложке.

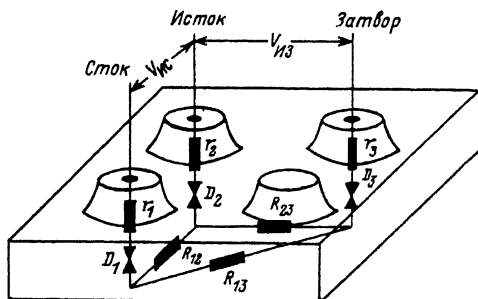
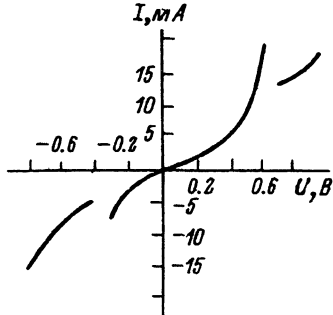


Рис. 1. ВАХ одного РТД на двухбарьерной гетероструктуре. Рис. 2. Общий вид и эквивалентная схема трех связанных РТД.

Диодные меза-структуры формировались по следующей технологии. После предварительной очистки поверхности исходной гетероструктуры на нее термовакуумным распылением наносился слой металлической композиции AuGeNi—Au, который вжигался импульсами некогерентного излучения ламп накаливания. Затем на этом слое методом фотолитографии и гальванического осаждения формировались круглые золотые контактные площадки диаметром 100 мкм. Расстояние между площадками составляло 600 мкм. Далее ионно-лучевым и химическим травлением создавались меза-структуры такой высоты, что их основание лежало в нижнем контактном слое и пластина разделялась на кристаллы, каждый из которых содержал значительное число меза-структур.

Измерение ВАХ проводилось зондовым методом. Типичная ВАХ диода приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, она асимметрична, что связано с несимметрией переходных областей между нелегированной и сильно легированными областями структуры. Максимальное значение отношения максимального и минимального токов в области ОДП составляло 1.5 при температуре $T = 300$ и 2.5 при $T = 77$ К. С уменьшением площади поперечного сечения РТД в 300 раз размеры верхней контактной площадки 5×5 мкм, отношение максимального тока к минимальному изменялось незначительно, что свидетельствовало о малых токах утечки по периферии меза-структуры.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены схема подключения контактных электродов к трем РТД, сформированным на одной подложке, и эквивалентная схема сформированного таким образом трехэлектродного устройства. В зависимости от напряжения, подаваемого на третий диод ($D3$) относительно диода $D2$, мы ограничимся случаем, когда это напряжение меньше резонансного. Возможны три ситуации, рассматриваемые далее.

1. Диод $D3$ отключен, а на верхний контакт диода $D1$ подано напряжение $U_{ис} > 0$. Таким образом, в этом диоде электроны инжектируются со стороны подложки (прямое смещение), а в диоде $D2$ — со стороны верхнего контакта (обратное смещение). На экспериментальной ВАХ (рис. 3, а) видны два резонансных пика — один при $U_{ис1} \approx 0.75$ В, а второй — при $U_{ис2} \approx 1.6$ В. Соответствующие пиковые значения токов равны $I_{p1} \approx 7$ и $I_{p2} \approx 15$ мА.

Очевидно, что при последовательном включении диодов $D1$ и $D2$ сильное превышение I_{p2} над I_{p1} возможно только в том случае, если ВАХ каждого из диодов асимметрична, причем пиковые токи диода при прямом и обратном включении должны различаться примерно как I_{p2} и I_{p1} , т. е. примерно в 2 раза. Действительно, из рис. 1 следует, что пиковый ток диода в прямом направлении

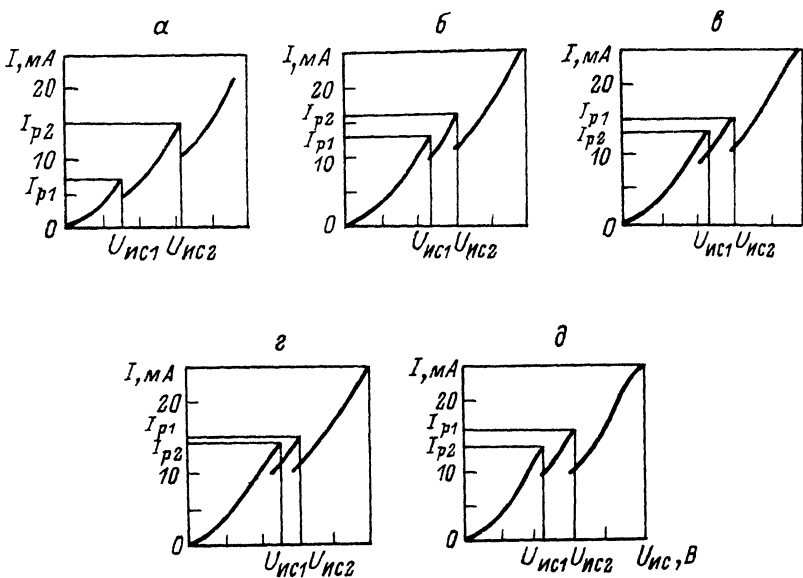


Рис. 3. ВАХ трех связанных РТД при разных напряжениях на диоде D_3 .
 $U_{нз}$, мВ: а — затвор не подключен, б — 0, в — 30, г — 60, д — 100.

($I_{p+} \approx 15$ мА) более чем в 2 раза превышает пиковый ток в обратном направлении ($I_{p1} \approx 7$ мА). Причем эти величины практически совпадают со значениями I_{p1} и I_{p2} на рис. 3, а₂ так что I_{p1} соответствует пиковому току диода D_2 , а I_{p2} — диода D_1 .

2. Верхний контакт диода D_3 (рис. 2) замкнут накоротко с верхним контактом диода D_2 ($U_{нз} = 0$). Таким образом, диоды D_2 и D_3 включены параллельно и оба в обратном направлении. При этом их пиковые токи ($I_{p_i}^{(i)}$, где $i = 1, 2, 3$ — номер диода) складываются, т. е. можно ожидать, что $I_{p_2}^{(2)} + I_{p_3}^{(3)} = I_{p_2}^{(2+3)} = 14$ мА. Это значение меньше чем пиковый ток диода D_1 , включенного в прямом направлении $I_{p_1}^{(1)} \approx 15$ мА. Поскольку при увеличении разности потенциалов, приложенной к последовательно соединенным диодам, первым переключается диод с меньшим пиковым током [7], первый резонансный пик на ВАХ должен примерно соответствовать $I_{p_2}^{(2+3)}$, а второй — $I_{p_1}^{(1)}$. Действительно, как видно из рис. 3, б, $I_{p1} \approx 13$, $I_{p2} \approx 16$ мА. Несколько меньшее значение I_{p1} по сравнению с $I_{p_2}^{(2+3)}$ может объясняться как небольшим различием пиковых напряжений $U_{p_2}^{(2)}$ и $U_{p_3}^{(3)}$, так и различием падений напряжений на сопротивлениях подложки R_{12} и R_{13} из-за различия этих сопротивлений, обусловленного, например, неодинаковым расстоянием от диода D_1 до диодов D_2 и D_3 .

Таким образом, параллельное подключение к диоду D_2 почти идентичного ему диода D_3 привело к примерному выравниванию высоты первого и второго резонансных пиков на прямой ветви ВАХ последовательно соединенных диода D_1 и диодов D_2 и D_3 . Вместе с тем первый пик заметно сместился в сторону больших напряжений $U_{нс}$ ($U_{p_1}^{(2+3)} \approx 1.2$ В) по сравнению с первым пиком на рис. 3, а ($U_{p_1}^{(1)} \approx 0.8$ В), тогда как положение второго пика на ВАХ практически не изменилось. Причину увеличения U_{p1} можно понять, учитывая, что в каждом РТД последовательно с собственно двухбарьерной гетероструктурой включены примыкающие к ней полупроводниковые слои с конечной проводимостью, а также контакты с отличным от нуля

сопротивлением. Двукратное увеличение тока, протекающего через диод $D1$ при подключении диода $D3$, вызывает дополнительное падение напряжения на этом диоде, уменьшающее разность потенциалов на паре $D2 + D3$, так что условие резонансного туннелирования в этих диодах выполняется при больших значениях $U_{ис}$.

3. На диод $D3$ подано небольшое (меньшее, чем $U_{p1}^{(2)}$) прямое напряжение смещения (рис. 3, в—д). Как и следовало ожидать, U_{p2} и максимальный ток I_{p2} второго пика, соответствующего резонансу диода $D1$, остаются практически неизменными. Значения U_{p1} и I_{p1} для первого пика сначала ($U_{из} \leq 60$ мВ, рис. 3, в, г) несколько возрастают, а затем уменьшаются (рис. 3, д). Такой характер зависимостей U_{p1} и I_{p1} от $U_{из}$ вполне объясним. Напряжение $U_{из} \approx 60$ мВ компенсирует начальную разницу в падении напряжений на диодах $D2$ и $D3$, вызванную, как отмечалось выше, различием расстояний между каждым из этих диодов и диодом $D2$, так что при $U_{из} \approx 60$ мВ значения I_{p1} и I_{p2} становятся практически равными. Последующее уменьшение тока I_{p1} вызвано уменьшением разности потенциалов, приложенной к диоду $D3$, и выходом последнего из резонанса.

Заключение. Представленные результаты демонстрируют возможность электрического управления ВАХ трех связанных копланарных РТД, изготовленных в едином технологическом процессе из одной двухбарьерной гетероструктуры на полуизолирующей подложке. К двум диодам подключались контакты истока и стока, а на третий (затвор) подавалось напряжение, меньшее резонансного. В такой системе обеспечивалось выравнивание высот двух резонансных пиков, что важно при использовании РТД в ячейках многоуровневой логики. Физическая интерпретация результатов позволяет целенаправленно изменять форму ВАХ. Полученные результаты могут использоваться и при формировании ВАХ трех связанных РТД на многобарьерных структурах.

Авторы благодарны В. Г. Мокерову, Б. К. Медведеву и Ю. В. Слепневу, предоставившим двухбарьерную гетероструктуру на полуизолирующей подложке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тагер А. С. // Электрон. техн. Сер. Электроника СВЧ. 1987. № 9. С. 19—31.
- [2] Долманов И. Н., Толстихин В. И., Еленский В. Г. // Зарубежн. радиоэлектрон. 1990. № 7. С. 66—89.
- [3] Soderstrom J., Anderson T. G. // IEEE Electron. Dev. Lett. 1988. V. 9. N 5. P. 200—202.
- [4] Potter R. C., Lakhani A. A., Hier H. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 7. P. 3735—3736.
- [5] Kuo T.-H., Lin H. C., Potter R. C., Shupe D. // Proc. IEEE Cornell Conf. Adv. Concepts High Speed Semicond. Dev. a Circuits. N. Y., 1989. P. 265—273.
- [6] Медведев Б. К., Мокеров В. Г., Слепнев Ю. В., Кальфа А. А., Крюков А. Р. // Письма ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 20. С. 76—78.
- [7] Lakhani A. A., Potter R. C. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. N 20. P. 1684—1685.

Научно-производственное объединение «Исток»
Фрязино

Получена 10.12.1991
Принята к печати 26.12.1991