

Отрицательная дифференциальная проводимость в широкозонных гетероструктурах, вызванная пространственным поперечным переносом электронов

Я.Б. Мартынов

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: показано, что если активная область транзистора состоит из полупроводниковых слоев, образующих две потенциальные ямы, то разогрев электронов электрическим полем в одной из этих ям может привести к инжекции и захвату электронов другой потенциальной ямой, что блокирует перенос электронов в транзисторе.

Ключевые слова: пространственный перенос электронов, отрицательная дифференциальная проводимость, полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов, квазигидродинамическая модель

1. Введение

Впервые конструкция диода, в котором может возникнуть отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП), вызванная поперечным пространственным переносом (ПП) была предложена Грибниковым в 1972 году [1], а затем независимо Хессом в 1979 [2]. Аналитическая модель была представлена Shichijo et al. в 1980 [3]. Компьютерное моделирование с помощью методов Монте Карло было проведено в том же году Glisson [4]. Первое экспериментальное подтверждение существования ОДП в диоде с ПП было получено Keever et al. в 1981 [5], а первый генератор на диоде с ПП создан Coleman et al. в 1982 [6]. Различные модификации данного прибора являются предметом научных исследований и не нашли пока коммерческого применения.

Для получения ОДП в диоде с ПП необходимо, чтобы электроны двигались вдоль границы двух разнотипных полупроводников с разной подвижностью, причем полупроводник с меньшей подвижностью должен иметь более высокий край зоны проводимости (иметь меньшее электронное сродство). При этом в малых электрических полях электроны движутся в материале с высокой подвижностью и имеют высокую дрейфовую скорость. С ростом величины электрического поля электроны греются и поэтому имеют возможность перейти в материал с меньшей подвижностью, средняя дрейфовая скорость электронов падает, что и приводит к появлению ОДП (рис.1(а,б)).

В 1982 году Kastalsky и Luryi предположили, что в структуре, состоящей из двух хорошо проводящих электроны полупроводниковых слоев, разделенных высоким потенциальным барьером, также возможно появление ОДП, если разогреть электрическим полем электроны в одном из слоев и оставить электроны холодными в другом [7]. В этом случае, разогрев электронов электрическим полем приводит к уходу части из них в слой с холодными электронами. Этому способствует форма разделяющего слоев барьера (рис. 1(в,г)). Проводимость слоя с горячими электронами уменьшается, что и приводит к появлению ОДП. На этом принципе был изготовлен транзистор (NERFET). Действительно, его измеренные вольт-амперные характеристики имели N-образный вид и при 77 °К и при 300 °К, а также получена генерация СВЧ колебаний при 77 °К [8].

В настоящей работе рассмотрена конструкция транзистора, подобного NERFET, в котором проводящий слой с холодными электронами заменен на пустую глубокую потенциальную яму. В таком приборе инжекция разогретых электрическим полем электронов через барьер и постепенное заполнение пустой потенциальной ямы приводит к появлению пространственного заряда в ранее пустом слое (рис.1(д,е)), запираению тока через транзистор. Эти рассуждения подтверждены с помощью численного решения квазигидродинамических уравнений [9], моделирующих перенос электронов в многослойной гетероструктуре.

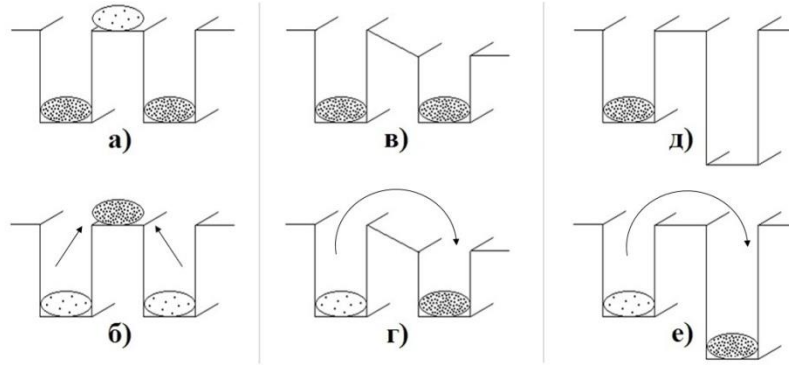


Рисунок 1. Разные способы формирования ОДП в гетероструктуре с помощью поперечного пространственного переноса. (а,б) – [1,2], (в,г) – [7], (д,е) – изучаемая структура. Высокая проводимость, слабое электрическое поле (а,в,д), низкая проводимость, сильное электрическое поле (б,г,е). Количество точек внутри эллипсов пропорционально концентрации электронов.

2. Конструкция транзистора и геометрия области расчета

Новая зонная структура, представленная на рисунке 1(д,е), может быть реализована с помощью многослойной структуры, показанной на рисунке 2. Предлагаемая структура носит условный характер, поскольку важны лишь разрывы зон и толщины слоев, а также потому, что на границе $Al_xGa_{1-x}N$ - AlN - GaN в действительности возникают плохо контролируемые слои, содержащие подвижные электроны.

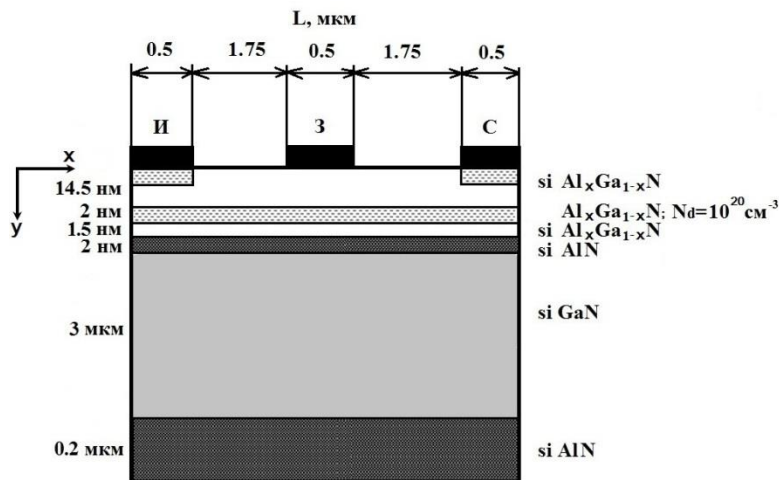


Рисунок 2. Поперечное сечение транзистора, в котором решаются уравнения переноса [9]. Зонная структура слоев соответствует показанной на рисунке 1(д,е). $x=0.25$.

3. Результаты 2D моделирования ВАХ с поперечным пространственным переносом электронов

ВАХ структуры, показанной на рисунке 2, рассчитанная с помощью уравнений [9] при увеличении напряжения исток-сток от 0 до 65 В, имеет ярко выраженный N-образный вид (рис.3). Расположенная в GaN, пустая при малых напряжениях исток-сток ($U_{ис}$), более глубокая потенциальная яма начинает с ростом $U_{ис}$ постепенно заполняться перешедшими через $Al_xGa_{1-x}N$ - AlN барьер электронами (рис.4). В диапазоне напряжений $U_{ис} \sim 0-7$ В перешедшие барьер электроны концентрируются близи стока (рис.4(а,б)) и практически не препятствуют переносу электронов в менее глубокой яме. После $U_{ис} \geq 8$ В количество перешедших в глубокую яму электронов становится настолько большим, что они начинают распространяться по этой яме к истоку. Заряд этих электронов резко уменьшает концентрацию электронов в первой яме (рис.4(в)), что блокирует протекание тока через транзистор. Величина тока исток-сток после переключения меняется в пределах 1-40 мА/мм и слабо зависит от напряжения затвора при небольших его значениях. При напряжениях на затворе близких к напряжению отсечки, не наблюдалось переходов электронов в глубокую потенциальную яму.

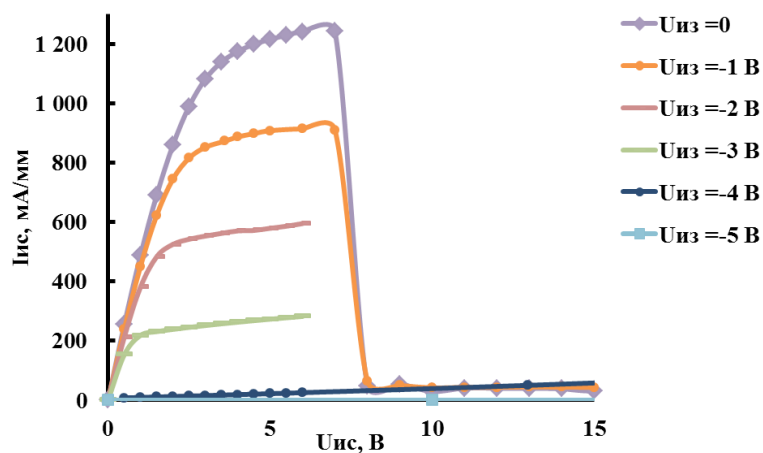


Рисунок 3. Расчётные ВАХ структуры, показанной на рисунке 2.

Заметим, что в конструкции транзистора, представленной на рисунке 2, электроды истока и стока хорошо электрически изолированы от двумерного электронного газа в глубокой потенциальной яме слоем AlN (скачок энергии края зоны проводимости между $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ – AlN составляет 1.65 эВ). Поэтому при снятии напряжения с транзистора, заряд, попавший в эту яму будет уходить очень долго. То есть ток через прибор будет надолго заблокирован. Таким образом, время блокировки тока невелико и определяется временем пролета электронов вдоль глубокой потенциальной ямы, а время ухода накопившегося в этой яме заряда должно определяться её глубиной, а также мощностью (произведением толщины на высоту) образующего эту яму барьера. Требуется дополнительные исследования для того чтобы понять можно ли сделать этот эффект высокочастотным.

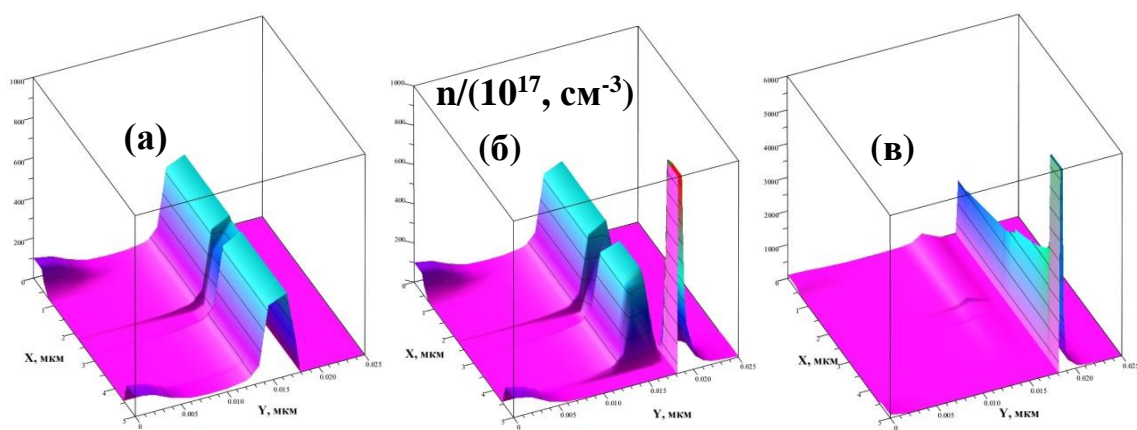


Рисунок 4. Зависимость рассчитанной концентрации электронов от координат в сечении транзистора (рис.2). $U_{из}=0$. $U_{ис}=1$ В (а), $U_{ис}=7$ В (б), $U_{ис}=8$ В (в).

4. Заключение

Первоначально в качестве преимуществ ОДП, полученной в результате поперечного пространственного переноса, назывались, во-первых, высокое быстродействие, поскольку переход происходит между полупроводниковыми слоями, отстоящими друг от друга на единицы нанометров и, во-вторых, возможность регулировки глубины ОДП с помощью подбора соответствующих полупроводниковых пар. Рассмотренный в настоящей работе механизм ОДП обладает довольно низким быстродействием, но чрезвычайно большой глубиной отрицательной дифференциальной проводимости. Из трех известных до сих пор способов формирования ОДП с помощью поперечного пространственного переноса, глубина ОДП для данного механизма наибольшая из всех.

Список литературы

1. Грибников З. С. Отрицательная дифференциальная проводимость в многослойной структуре. /З. С. Грибников //ФТП. — 1972. — Т. 6. — Вып. 7. — С. 1380—1382.
2. Hess K. Negative differential resistance through real-space electron transfer / K. Hess, H. Markos, H. Schichijo, B. G. Streetman// Appl. Phys. Lett. — 1979. — Vol. 35. —No 6. — P. 469—471.
3. Schichijo H. Real-space electron transfer by thermionic emission in GaAs—Al_xGa_{1-x}As heterostructures: Analytical model for large layer widths. /H. Schichijo, K. Hess, B.G. Streetman // Solid St. Electron. — 1980 — Vol 23. — No 8 —P. 817—822.
4. Glisson T. H. Monte-Carlo simulation of real space electron transfer in GaAs—AlGaAs heterostructures. /T. H. Glisson, J. R. Hauser, M. A. Littlejohn//J. Appl. Phys. —1980. —Vol. 51. — No 10. — P.5445—5449.
5. Keever M., Shichijo H., Hess K., Banerjee S., Witkowski L., Morkoc H., Streetman B. G. //Appl. Phys. Lett., —1981. —Vol. 38. — P. 36.
6. Coleman P. D., Freeman J., Morkoc H., Hess K., Streetman B., Keever M. //Appl. Phys. Lett., —1982. — Vol. 40. —P. 493.
7. Kastalsky A. Novel Real-Space Hot-Electron Transfer Devices. /A. Kastalsky, S. Luryi // IEEE Electron Device Letters. — 1983. — Vol. EDL-4. — No 9. — P. 334—336.
8. Kastalsky A. Microwave Generation in NERFET. /A. Kastalsky, R.A. Kiehl, S. Luryi, A.C. Gossard, R. Hendel // IEEE Electron Device Letters. — 1984. — Vol. EDL-5. — No 8. — P. 321—323.
9. Мартынов Я.Б. Специальный вид граничных условий для системы уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы. / Я.Б. Мартынов// ЖВМ и МФ —1999. — №2. —С. 309-314.