

# 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

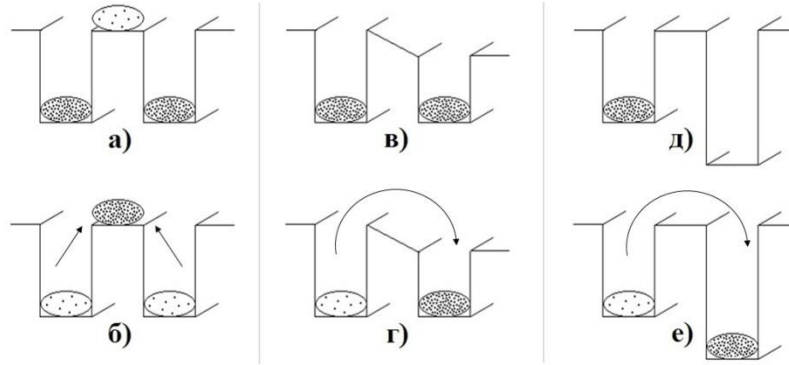
## 1. Введение

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].

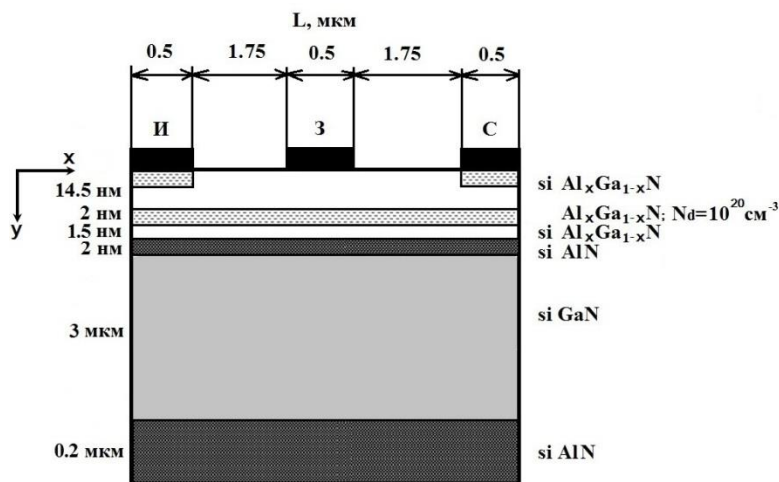
В настоящей работе рассмотрена конструкция транзистора, подобного NERFET, в котором проводящий слой с холодными электронами заменен на пустую глубокую потенциальную яму. В таком приборе инжекция разогретых электрическим полем электронов через барьер и постепенное заполнение пустой потенциальной ямы приводит 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.

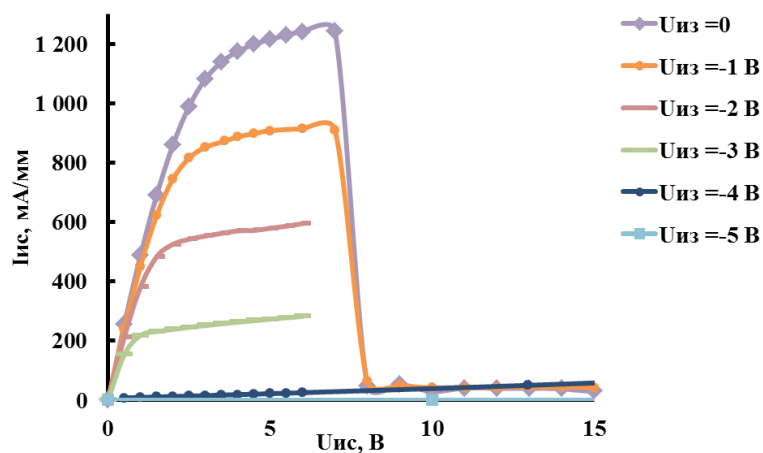
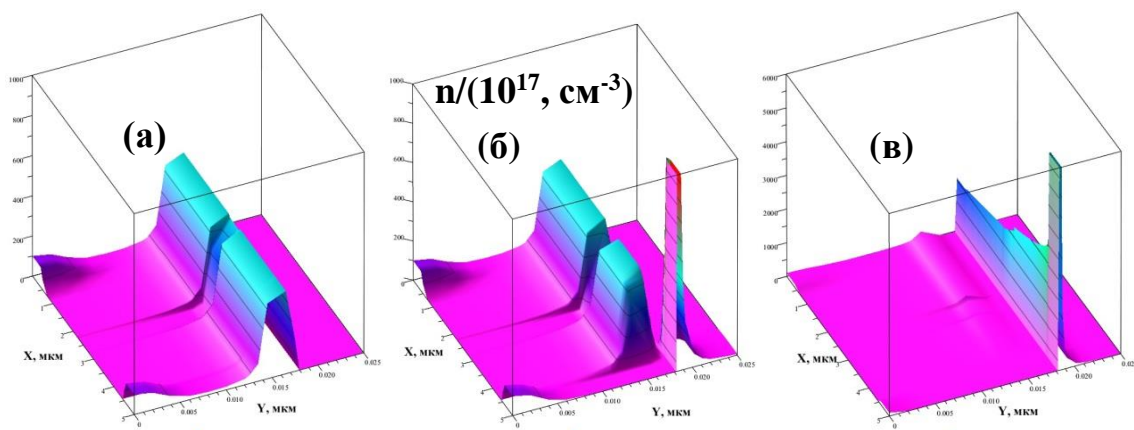


Рисунок 3. Расчётные ВАХ структуры, показанной на рисунке 2.

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<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>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.