

## Исследование механизма образования 2D-канала в AlGaN-GaN транзисторной структуре

Я.Б. Мартынов, А.В. Галдецкий

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** предложена новая физическая модель образования 2D-канала в AlGaN-GaN транзисторной структуре, в которой основную роль играют донорные и акцепторные поверхностные уровни. Модель поверхностных уровней аналогична используемой при измерениях высоты барьеров Шоттки.

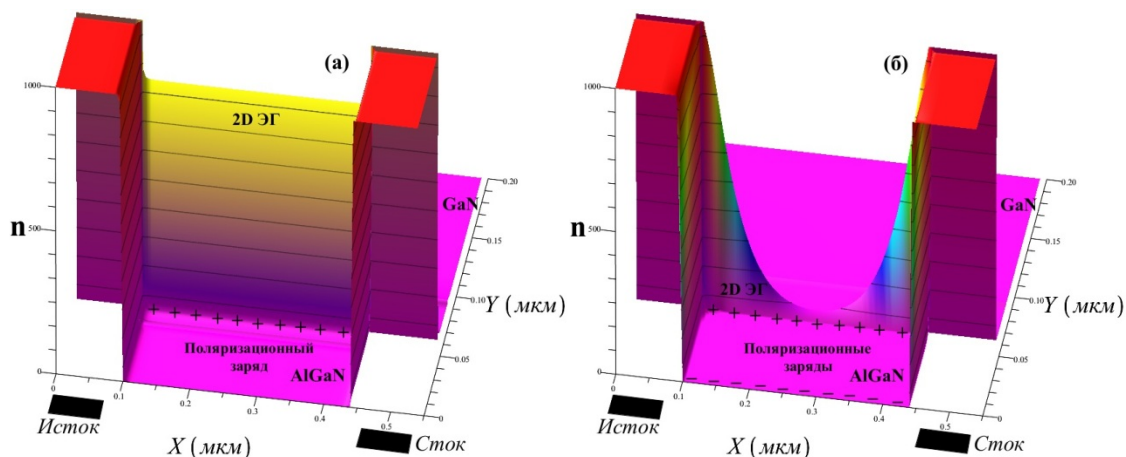
**Ключевые слова:** нитрид-галлиевый транзистор, двумерный электронный газ, численное моделирование, квазигидродинамическая модель.

Нитрид-галлиевые транзисторные структуры находят широкое применение в СВЧ технике. Важной характеристикой таких структур является поверхностная плотность заряда электронов, образующаяся на границе широкозонного (AlGaN) и более узкозонного (GaN) материалов. Важно, что слой двумерного электронного газа (2D ЭГ) в нитрид-галлиевых гетероструктурах образуется без специального легирования какого-либо из полупроводниковых материалов. Принято считать, что в образовании 2D ЭГ определяющую роль играет поляризация. Поскольку и AlGaN и GaN являются пьезоэлектриками, обладающими пьезоэлектрическими свойствами и постоянные решеток этих материалов не совпадают, то на границе раздела этих материалов возникают деформации, приводящие к появлению поляризационного заряда, притягивающие электроны и создающего слой 2D ЭГ. Однако, возникающая поляризация должна приводить к образованию поляризационных зарядов также и на других границах полупроводниковых слоев. Проведенное моделирование транзисторные структуры с помощью численного решения двумерных уравнений движения носителей тока в квазигидродинамическом приближении [1] показало необходимость экранировки поляризационного заряда на всех границах, кроме области формирования 2D ЭГ. В противном случае плотность поверхностного заряда в области 2D ЭГ сильно уменьшается, что приводит к деградации характеристик изготовленных на этих структурах приборов.

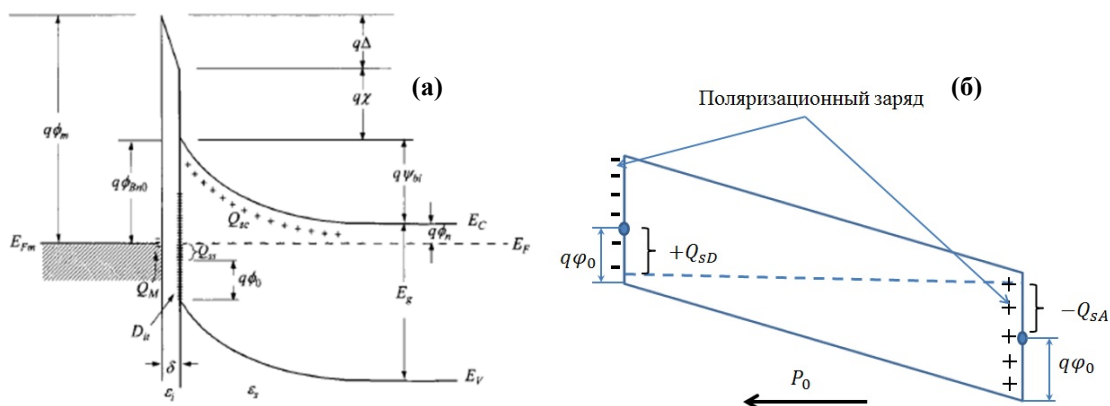
Действительно, учет положительного поляризационного заряда только на границе раздела AlGaN - GaN приводит к появлению глубокой потенциальной ямы, в которой слой 2D ЭГ формируется за счет электронов, приходящих из сильнолегированных донорами контактов (Рис.1(а)). Если же учесть дипольный заряд, создаваемый поляризацией на обеих поверхностях AlGaN слоя толщиной ~50 нм, то глубина потенциальной ямы резко уменьшается и слоя 2D ЭГ не образуется (Рис.1(б)).

С другой стороны известно, что на свободной поверхности любого полупроводника обрыв кристаллической решетки приводит к образованию множества энергетических уровней в запрещенной зоне. Модель такой поверхности, в частности, создана для расчета высоты барьера Шоттки (Рис. 2(а)) [2]. Считается, что уровни в запрещенной зоне распределены с плотностью  $D_{it}$ . Причем считается, что имеется уровень энергии  $q\phi_0$  – называемый нейтральным, ниже которого расположены донорные уровни (нейтральные, когда заполнены и положительно заряженные, когда пустые). Выше этого уровня расположены акцепторные уровни (нейтральные, когда пустые; отрицательно заряженные, когда заполнены). В этом случае на поверхности

полупроводника образуется заряд, знак которого зависит от положения уровня Ферми ( $E_F$ ) по отношению к уровню  $q\phi_0$ . Если уровень Ферми лежит выше нейтрального  $E_F > q\phi_0$ , то заряд на поверхностных уровнях отрицательный. Если  $E_F < q\phi_0$ , то заряд положительный. Заметим, что поляризационный заряд создает внутри слоя полупроводника поле, искривляющие края зон (валентной и проводимости) таким образом, что  $E_F < q\phi_0$  именно на той стороне слоя, где поляризационный заряд отрицателен и  $E_F > q\phi_0$  на той стороне слоя, где поляризационный заряд положителен (Рис. 2(б)). Таким образом, заряд на донорных и акцепторных поверхностных уровнях компенсирует поляризационный заряд на внешних сторонах двухслойной транзисторной структуры. На границе же раздела AlGaN – GaN плотность уровней внутри запрещенной зоны либо существенно меньше, либо эта плотность и вовсе близка к нулю в зависимости от продвинутой используемой технологии. Поэтому на этой границе имеется не скомпенсированный положительный поляризационный заряд, приводящий к образованию канала с 2D ЭГ. Расчет, выполненный по модели [1] для двухслойной транзисторной структуры, в которой поверхность полупроводника рассматривалась описанным выше способом, показал, что в такой структуре образуется слой 2D ЭГ с концентрацией электронов близкой к показанной на рисунке 1(а).



**Рисунок 1.** Рассчитанное распределение концентрации электронов  $n$  (отнесенной к  $n_0=10^{17}$  см<sup>-3</sup>) в сечении двухслойной транзисторной структуры AlGaN-GaN для случая экранированных (а) и неэкранированных (б) поверхностных поляризационных зарядов.



**Рисунок 2.** Зонная диаграмма, учитывающая заряд на поверхностных уровнях для барьера Шоттки [2] (а) и для слоя пьезоэлектрического полупроводникового материала с поляризацией  $P_0$  (б).  $+Q_{SD}$  и  $-Q_{SA}$  заряды на поверхностных донорных и акцепторных уровнях, компенсирующие поляризационные заряды.

Построенная модель и проведенные расчеты транзисторной структуры AlGaN – GaN показали, что свободная поверхность специально нелегированного пьезоэлектрика играет важную роль в образовании слоя двумерного электронного газа, образующего проводящий канал широкозонных полевых транзисторов. Поэтому правильный подбор защитных покрытий и буферных слоев со стороны подложки существенно влияет на высокочастотные свойства этих приборов.

#### Список литературы

1. Мартынов Я.Б. Специальный вид граничных условий для системы уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы./ Я.Б. Мартынов// ЖВМ и МФ —1999. — №2. —С. 309-314.
2. С. Зи Физика полупроводниковых приборов, Москва, «Мир», 1984.