

УДК 621.382

С. В. ЧУГУНОВ¹, Э. В. ЧУГУНОВА², А. С. ЧУГУНОВ¹¹Брест, БрГТУ²Брест, гимназия № 4**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ
В НЕМТ-ТРАНЗИСТОРАХ**

В последние десятилетия активно разрабатываются НЕМТ-транзисторы, представляющие собой полевые транзисторы, в которых для создания канала используется контакт двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. Контакт разнородных полупроводников, т. н. гетеропереход, создает излом и разрыв зонных границ, в результате которого в тонкой области дно зоны проводимости узкозонного полупроводника опускается ниже уровня ферми, что приводит к образованию тонкого электропроводящего слоя. Как часто говорят, в этом слое образуется двумерный электронный газ (ДЭГ). Т. к. соединение GaN обладает высокой подвижностью электронов, удастся создать гетероструктурные полевые транзисторы AlGaIn/GaN с уникальными характеристиками, а именно с высокими значениями выходной мощности, рабочей частоты и температурного диапазона функционирования.

Плотность связанных состояний электронов в квантовой яме согласно [1] определяется выражением:

$$n_{bound}(z) = \frac{m_e kT}{\pi h^2} \sum_v |\psi_v(z)|^2 \ln \left[1 + \exp \left(\frac{F_n - E_v}{kT} \right) \right], \quad (1)$$

где k , h , m_e – постоянная Больцмана, Планка, эффективная масса на, $\psi_v(z)$ – волновая функция электронов в яме, определяемая при решении уравнения Шредингера, F_n – энергия Ферми. В нормальных условиях, при температуре около 300 К можно полагать, что только два нижних уровня находятся в зоне проводимости GaN, поэтому концентрация электронов ДЭГ выразится из (1) в следующем виде:

$$n_s = DkT * \ln \left(\left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_1}{kT} \right) \right) * \left(\left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_2}{kT} \right) \right) \right) \right), \quad (2)$$

где D – постоянный коэффициент, E_F – уровень Ферми GaN относительно дна зоны проводимости.

Влияние затвора на концентрацию электронов можно описать с использованием параметра порогового напряжения:

$$n_s(m) = \frac{e(m)}{q(d_d + d_i)} \left(U_g - U_{пор} - \frac{E_F}{q} \right) \quad (3)$$

Здесь q – заряд электрона, ϵ и $d = d_d + d_i$ – диэлектрическая проницаемость и полная толщина слоя AlGaN соответственно; $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение НЕМТ, которое определяется формулой:

$$U_{\text{пор}} = \varphi_b - \Delta E_c - \frac{qN_s d_{\text{AlGaN}}^2}{2\epsilon_{\text{AlGaN}}} - \sigma \frac{d_{\text{AlGaN}}}{\epsilon_{\text{AlGaN}}}, \quad (4)$$

где φ_b – эффективная высота барьера Шоттки, ΔE_c – разрыв зоны проводимости на границе раздела между AlGaN и слоями GaN. $\frac{qN_s d_{\text{AlGaN}}^2}{2\epsilon_{\text{AlGaN}}}$ – концентрация легирования в слое n-AlGaN, а σ – плотность зарядов поляризации на границе раздела. Уравнения (2) и (3) образуют систему уравнений, решение которой дает концентрацию ДЭГ, образующего канал транзистора:

$$n_s(m) = \frac{2e^2 m_e d}{2e^2 m_e d + \epsilon_m \pi \hbar^2} \left[(U_g - U_{\text{пор}}) \frac{\epsilon_m}{ed} + \frac{m_e}{\pi \hbar^2} (E_1 + E_2) \right] - \frac{m_e}{\pi \hbar^2} (E_1 + E_2) \quad (5)$$

где E_1 и E_2 – энергии уровней.

В данной работе представлено моделирование распределения концентрации носителей в НЕМТ-транзисторах на основе GaN с помощью программного продукта FETIS. В качестве рабочей модели был взят транзистор с минимальным количеством слоев: (сверху – вниз) металл, n-AlGaN, нелегированный AlGaN, нелегированный GaN с 2-мерным электронным газом (ДЭГ), подложка. Такая упрощенная модель не содержит барьера AlN между каналом GaN и барьерным AlGaN слоями, не учитывает влияние множества переходных слоев реальных НЕМТ. Однако для качественного рассмотрения данными тонкостями можно пренебречь.

Программное обеспечение FETIS разработано для моделирования полевых транзисторов с высокой электронной подвижностью на основе нитрида III группы. Он включает в себя 1D симулятор зонной диаграммы и распределение потенциала по гетероструктуре устройства и графическую оболочку, обеспечивающую удобную работу с кодом и визуализацию результатов моделирования. В FETIS имеются как квазиклассическое, так и точное квантово-механическое рассмотрение удержания носителей в структуре НЕМТ, основанной на самосогласованном решении уравнений Пуассона и Шредингера. Этот код позволяет предсказать такие важные характеристики и параметры НЕМТ, как профиль концентрации носителей, число и энергетическое положение двумерных подзон электронов и дырок и т. д., а также их изменение при смещении затвора.

Уравнения Пуассона и Шредингера решаются методом конечных разностей 2-го порядка. В программе используется однородная сетка, чтобы получить симметричную гамильтонову матрицу.

В результате моделирования нами была получена зависимость концентрации электронов от толщины гетероструктуры и напряжений на затворе.

Было установлено, что при изменении напряжения на затворе от 0 В до –4 В концентрация электронов уменьшается в 24 раза, а максимальное значение концентрации электронов равно $3,61 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и соответствует напряжению на затворе равному 0 В. Так как ДЭГ образуется в очень тонком слое гетероперехода, то расчет подтвердил, что концентрация носителей тем больше, чем этот слой уже.

Также был произведен расчет концентрации электронов вдоль канала НЕМТ-транзистора. При этом длина затвора выбиралась равной 1×10^{-4} см, длина исток – затвор – 1×10^{-4} см, длина сток – затвор – 2×10^{-4} см. Результаты расчетов показаны в таблице.

Из таблицы видно, что при изменении напряжения на затворе от –6 В до –2 В канал при напряжении стока 1 В всегда открыт, а при 10 В перекрыт. При этом наибольшая длина перекрытия соответствует –6 В и при увеличении напряжения на стоке от 2 В до 10 В увеличивается в 4,2 раза, что позволяет эффективно управлять током в канале.

Таблица – Зависимость длины ($\times 10^{-4}$ см) области перекрытия канала между затвором и стоком от напряжений на затворе и стоке

Напряжение на затворе, В	Напряжение на стоке, В						
	1	2	3	4	5	7	10
–2	–	–	–	–	–	–	0,01
–3	–	–	–	–	–	0,01	0,03
–4	–	–	–	–	0,02	0,05	0,09
–5	–	–	0,03	0,07	0,11	0,17	0,26
–6	–	0,16	0,29	0,39	0,46	0,57	0,67

Список использованной литературы

1. Оптимизация параметров НЕМТ-гетероструктур GaN/AlN/AlGaN для СВЧ транзисторов с помощью численного моделирования / В. Г. Тихомиров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, вып. 2. – С. 245–249.