

МОДЕЛИРОВАНИЕ NORMALY-OFF НЕМТ-ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/AlN/GaN

Институт физики им. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Представлены результаты моделирования нормально-закрытого режима работы НЕМТ-транзистора на основе гетероструктур AlGaN/AlN/GaN с толщиной слоя AlN 1 нм. Для достижения нормально-закрытого состояния используется метод формирования слоя p-GaN толщиной 40 нм под затвором. Расчеты показывают, что нормально-закрытое состояние достигается при использовании относительно тонких слоев AlGaN с невысоким содержанием Al. Нормально-закрытое состояние транзистора было получено для следующих параметров моделируемой структуры: 15% Al – AlGaN 18 нм, 18% Al – AlGaN 14 нм, 20% Al – AlGaN 12 нм, 22% Al – AlGaN 11 нм, 25% Al – AlGaN 10 нм.

Введение. Сегодня кремний является основным материалом для создания полупроводниковых приборов. В настоящее время около 87% рынка устройств силовой электроники основано на кремниевой технологии [1]. Однако эффективность устройств на основе кремния уже практически подошла к своему физическому пределу [2]. В этой связи большие усилия были направлены на поиск и исследования альтернативных полупроводниковых материалов. Устройства силовой электроники следующего поколения должны иметь высокое отношение токов включения/выключения, высокое напряжение пробоя, высокую скорость переключения, отличные рабочие характеристики при высоких температурах, низкое сопротивление во включенном состоянии, низкие токи утечки. Одним из наиболее привлекательных материалов для создания силовых устройств, удовлетворяющих вышеперечисленным характеристикам, является нитрид галлия (GaN) [1, 3, 4]. GaN обладает широкой запрещенной зоной ($E_g \approx 3.4$ эВ), что обеспечивает высокие значения напряженности критического поля, т.е. высокое напряжение пробоя. Достаточно большое значение ширины запрещенной зоны позволяет также увеличить максимальную температуру работы устройств на основе GaN и снизить токи утечки [4].

Структура GaN-транзистора, используемая для создания силовых устройств, представляет собой транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), которые имеют проводящий канал с двумерным электронным газом на гетерогранице между AlGaN(AlN)/GaN. Концентрация двумерного электронного газа достигает значений $\sim 10^{13}$ см⁻², а подвижность электронов в двумерном газе составляет 1500 – 2000 см²/В·с [1, 3]. Поскольку канал исток/сток является проводящим, устройство GaN-НЕМТ считается нормально-открытым, так как для протекания тока исток/сток не требуется напряжение на затворе. Для применения в силовых устройствах необходимо реализовать нормально-закрытый режим работы транзистора, в котором канал не проводит ток при нулевом напряжении на затворе. Одним из методов реализации нормально-закрытого состояния НЕМТ-транзистора является создание слоя p-типа проводимости под затвором, который истощает канал в области под затвором, тем самым нарушает проводящее состояние последнего [3, 4]. В нашей работе мы приводим результаты моделирования нормально-закрытых транзисторных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN посредством формирования слоя p-GaN в области под затвором.

Моделирование нормально-закрытого режима транзистора AlGaN/AlN/GaN. Для моделирования была выбрана следующая транзисторная структура. Барьерный слой Al_xGa_{1-x}N ограничен снизу дополнительным барьерным слоем AlN толщиной 1 нм. Слой AlN уменьшает рассеяние электронов на границе AlGaN/GaN и способствует увеличению концентрации двумерного электронного газа [6]. На границе AlN/GaN формируется канал с двумерным электронным газом. Слой p-GaN толщиной 40 нм с концентрацией акцепторов $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ формировался в области под электродом затвора на AlGaN. Моделируемая транзисторная гетероструктура представлена на рисунке 1.

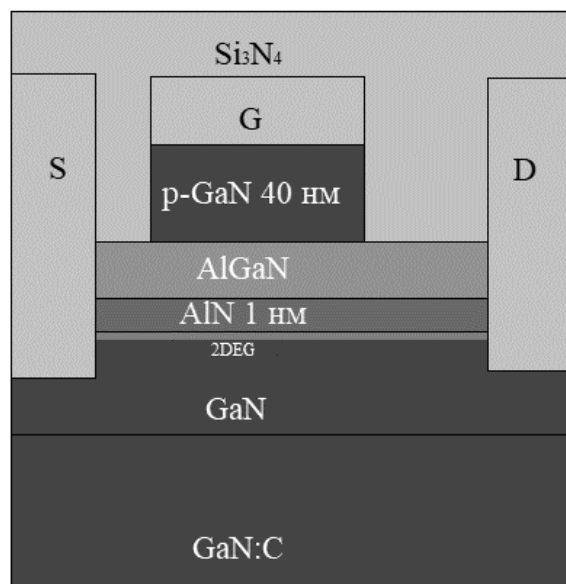


Рисунок 1 – Моделируемая транзисторная гетероструктура. S, D и G обозначают соответственно контакты истока, стока и затвора.

Основная цель моделирования – определить параметры структуры, обеспечивающие закрытое состояние транзистора. Для этой цели при моделировании задавались слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с различным содержанием Al и определялось изменение концентрации двумерного электронного газа в канале. Также рассчитывался ток исток/сток в зависимости от напряжения стока при нулевом напряжении на затворе при развертке напряжения стока от 0 до 25 В. Транзистор считался нормально-закрытым, если значение тока стока не превышало $\sim 10^{-6}$ А/мм. Расчеты показали, что основным параметром, определяющим нормально закрытое состояние рассматриваемого транзистора (рис. 1), является толщина слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, которая не должна превышать некоторого предельного значения, отличающегося для различных значений x . Для высокого содержания Al ($x > 0.25$) мы не получили нормально-закрытого состояния рассматриваемой транзисторной структуры. Помимо этого, при толщине AlGaN более 20 нм транзистор является нормально-открытым даже для низкого состава $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x < 0.15$). Полученные значения максимальной толщины $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, при которой транзистор является нормально-закрытым, для некоторых значений x представлены на рисунке 2.

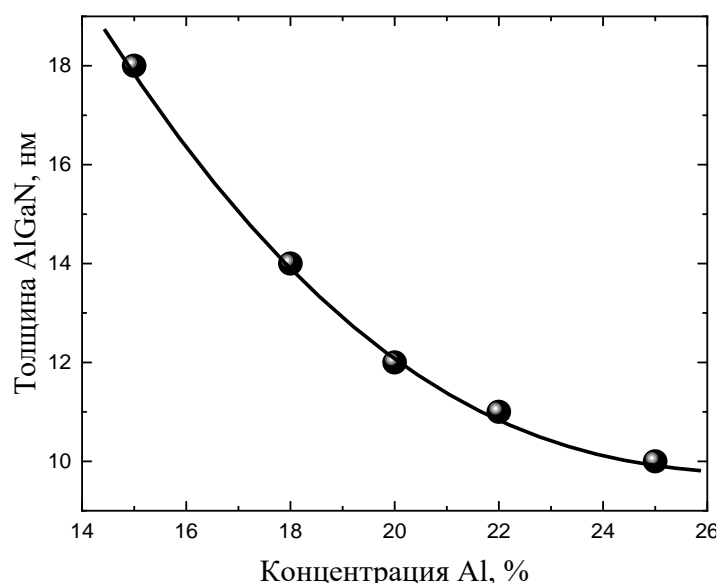


Рисунок 2 – Полученные в результате моделирования значения максимальной толщины слоя AlGaN, при которой транзистор остается в нормально-закрытом состоянии, в зависимости от содержания Al.

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Для 15% Al нормально-закрытое состояние транзистора достигается при толщине AlGa_xN, не превышающей 18 нм, для 18, 20, 22 и 25% Al максимальная толщина слоя AlGa_xN составляет, соответственно, 14, 12, 11 и 10 нм. В целом расчеты показывают, что добиться нормально-закрытого состояния транзисторной структуры AlGa_xN/AlN/GaN с толщиной AlN 1 нм можно, используя относительно тонкие слои Al_xGa_{1-x}N с невысоким содержанием Al. Чем выше концентрация Al, тем тоньше должен быть слой AlGa_xN для достижения нормально-закрытого режима работы транзистора. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других теоретических и экспериментальных работ [4, 6].

Список литературы

1. Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices / F. Roccaforte, P. Fiorenza, G. Greco, R. Lo Nigro, F. Giannazo, F. Lucolano, M. Saggio // *Microelectronic Engineering*. – 2018. – V. 187-188. – P. 66 – 77.
2. Materials and processing issue in vertical GaN power electronics / J. Hu, Y. Zhang, M. Sun, D. Piedra, N. Chowdhury, T. Palacios // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 2018. – V.78. – P. 75 – 84.
3. Normally-OFF GaN HEMT for high power and high-frequency applications / A. Z. Musa, M. Mohamad Isa, N. Ahmad, S. Taking, F.A. Musa // *AIP Conf. Proc.* – 2021. – V. 2347. – P. 020121(8).
4. Нормально закрытый транзистор с затвором р-типа на основе гетероструктур AlGa_xN/GaN / В. И. Егоркин, В. А. Беспалов, А. А. Зайцев, В. Е. Земляков, В. В. Капаев, О. Б. Кухтяева // *Известия вузов. Электроника*. – 2020. – Т. 25. – №5. – С. 391 – 401.
5. A comprehensive analysis of AlN spacer and AlGa_xN n-doping effects on the 2DEG resistance in AlGa_xN/AlN/GaN heterostructures / C. Piotrowicz, B. Mohamad, B. Rustemi, N. Malbert, M.A. Jaud, W. Vandendaele, M. Charles, R. Gwoziecki // *Solid State Elec.* – 2022. – V. 194. – P. 108322(4).
6. Recessed-gate structure approach toward normally-off high-voltage AlGa_xN/GaN HEMT for power electronics applications / W. Saito, Yo. Takada, M. Kuraguchi, K. Tsuda, I. Omura // *IEEE Trans. Elec. Devices*. – 2006. – V. 53. - №. 2. – P. 356 – 362.