

УДК 621.382.323:519.67-047.58

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ GAN/ALGAN HEMT В СРЕДЕ WOLFRAM MATHEMATICA

Е.В. ЖУК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: zegor091@gmail.com

Аннотация. Представлен программный комплекс в среде *Wolfram Mathematica* для параметрического моделирования и оптимизации гетероструктурных транзисторов GaN/AlGaN HEMT. Комплекс реализует расчет статических выходных характеристик, крутизны, порогового напряжения, а также оценку высокочастотных параметров f_T и f_{MAX} с учетом температуры канала, длины затвора и паразитных элементов. Выполнены вычислительные эксперименты по исследованию семейства выходных ВАХ, зависимости g_m от напряжения затвора, карты распределения порогового напряжения, температурной деградации частотных характеристик, влияния масштабирования длины затвора и оптимизации параметров гетероструктуры. Показано, что в рамках принятой модели повышение температуры канала от 300 до 600 К снижает f_T примерно с 66 до 46 ГГц, а уменьшение длины затвора от 1,0 до 0,05 мкм повышает f_T примерно с 20 до 115 ГГц. Найдена рациональная область проектных параметров для затвора 0,15 мкм: толщина барьера AlGaN около 15 нм, мольная доля Al около 28,3 %, пороговое напряжение около -2,50 В и прогнозная предельная частота около 97,8 ГГц.

Abstract. A software package in *Wolfram Mathematica* for parametric modeling and optimization of GaN/AlGaN HEMTs is presented. The package provides calculation of static output characteristics, transconductance, threshold voltage, and estimation of the high-frequency parameters f_T and f_{MAX} with account for channel temperature, gate length, and parasitic elements. Computational experiments were carried out for the output I-V family, g_m versus gate voltage, threshold-voltage map, thermal degradation of frequency characteristics, gate-length scaling, and heterostructure optimization. Within the adopted model, increasing the channel temperature from 300 to 600 K reduces f_T from about 66 to 46 GHz, whereas decreasing the gate length from 1.0 to 0.05 μm raises f_T from about 20 to 115 GHz. A rational parameter region for a 0.15 μm gate was obtained: AlGaN barrier thickness about 15 nm, Al mole fraction about 28.3%, threshold voltage about -2.50 V, and predicted cutoff frequency about 97.8 GHz.

Введение

GaN/AlGaN HEMT относятся к числу наиболее перспективных приборов современной СВЧ- и миллиметровой электроники благодаря высокой плотности двумерного электронного газа, большому напряжению пробоя и возможности работы при повышенных напряженностях электрического поля [1]. Физическая основа работы таких транзисторов связана с формированием 2DEG на границе AlGaN/GaN под действием спонтанной и пьезоэлектрической поляризации [1]. Это делает структуры данного типа востребованными для усилителей мощности, приемопередающих модулей, радиолокационных систем и перспективных узлов связи диапазонов *microwave* и *mm-wave* [2], [3].

Одновременно с ростом рабочих частот повышаются требования к быстрому инженерному анализу транзисторных структур. Полноценное TCAD-моделирование дает высокую точность, однако на ранних этапах проектирования оно требует значительных вычислительных затрат. Поэтому актуальны компактные полуэмпирические модели, позволяющие оперативно исследовать влияние геометрии, состава гетероструктуры, температуры и паразитных элементов на основные характеристики прибора [4–6]. Целью настоящей работы является разработка программного комплекса в среде *Wolfram Mathematica* для параметрического моделирования и оптимизации GaN/AlGaN HEMT, ориентированного на предварительное проектирование и сравнение вариантов гетероструктуры.

Математическая модель транзистора

В основу программного комплекса положена компактная полуэмпирическая модель, в которой сохранены наиболее значимые для инженерного анализа физические связи между параметрами гетероструктуры и электрическими характеристиками прибора. В отличие от полноценных численных TCAD-подходов, здесь

используется аналитическое описание, позволяющее за короткое время многократно пересчитывать характеристики при варьировании состава AlGa_N, толщины барьерного слоя, длины затвора и температуры канала. Такой подход особенно удобен при решении задач предварительного проектирования, когда необходимо не столько детально реконструировать распределение полей и концентраций во всем объеме структуры, сколько быстро оценить тенденции и выявить чувствительные параметры [4–6].

Первым базовым звеном модели является параметрическое описание порогового напряжения. В рассматриваемой реализации оно задается как функция мольной доли алюминия и толщины барьерного слоя AlGa_N. Подобная аппроксимация отражает известный физический факт: увеличение поляризационных эффектов при росте содержания Al и изменение эффективной толщины барьера приводят к смещению режима отсечки. Хотя такая зависимость не претендует на полное описание всех механизмов формирования порога, она позволяет получить наглядную двумерную карту проектных состояний и оценить, в какой области параметров прибор сохраняет требуемый режим управления затвором [1], [2].

Второй важный элемент модели связан с описанием концентрации двумерного электронного газа. Для обеспечения устойчивой работы численного алгоритма в окрестности порогового режима в коде введена сглаженная функция эффективного напряжения затвора. За счет этого переход от закрытого канала к открытому происходит непрерывно, без разрывов производных, что особенно важно при дальнейшем вычислении крутизны и частотных характеристик. Получаемая концентрация *2DEG* зависит одновременно от эффективного напряжения на затворе и от толщины барьерного слоя, поэтому модель естественным образом связывает геометрию гетероструктуры с уровнем тока стока.

Ток стока задается гладкой аналитической функцией, которая сочетает признаки короткоканального режима, насыщения скорости носителей и перехода от линейной области к квазинасыщению. Температурное влияние учитывается через деградацию подвижности и уменьшение скорости насыщения электронов при нагреве канала. Дополнительно в выражение для тока введен множитель, аналогичный эффекту Эрли, что позволяет воспроизвести положительный наклон выходных характеристик в области насыщения. Паразитное сопротивление истока входит в модель не как внешний поправочный коэффициент, а как параметр, непосредственно подавляющий эффективную крутизну прибора. Благодаря этому уже на уровне статической модели учитывается ухудшение управляемости канала при росте омических потерь.

На основе аналитического выражения для тока автоматически определяются малосигнальные параметры. Крутизна g_m и выходная проводимость g_{ds} вычисляются дифференцированием по напряжениям затвора и стока соответственно. Емкость затвор-исток C_{gs} задается отдельной гладкой зависимостью, ограниченной в области закрытого канала. Далее из совокупности g_m , g_{ds} , C_{gs} и паразитной емкости C_{gd} формируются оценки предельной частоты f_T и максимальной частоты генерации f_{MAX} . Таким образом, в программном комплексе реализована сквозная цепочка «параметры гетероструктуры – токовые характеристики – малосигнальные параметры – СВЧ-показатели», что и составляет основную научно-прикладную ценность разработанной модели.

Структура программного комплекса

Программный комплекс построен по модульному принципу и включает блок задания физических констант и параметров структуры, ядро модели статических характеристик, модуль вычисления малосигнальных параметров и блок высокочастотных оценок. В качестве базовых переменных используются длина и ширина затвора, толщина барьерного слоя AlGa_N, мольная доля алюминия, температура канала, а также паразитные сопротивления и емкости. Пороговое напряжение задается параметрически через состав и толщину барьера, а ток стока определяется гладкой аналитической зависимостью, обеспечивающей устойчивое вычисление производных вблизи области отсечки.

В малосигнальном блоке автоматически рассчитываются крутизна g_m , выходная проводимость g_{ds} и эквивалентная емкость затвора C_{gs} . Далее на их основе определяются предельная частота f_T и максимальная частота генерации f_{MAX} с учетом паразитных элементов R_s , R_g и C_{gd} . Отдельный оптимизационный модуль реализует поиск рациональных параметров гетероструктуры по выбранному критерию качества. В настоящей работе в качестве целевой функции принят максимум f_T при фиксированной длине затвора и ограничениях на допустимый диапазон порогового напряжения и технологические параметры эпитаксии.

Логика программной реализации ориентирована на последовательное прохождение пользователем всех уровней анализа. На первом этапе задаются исходные технологические параметры и формируется базовая конфигурация структуры. На втором этапе выполняется расчет статических зависимостей, позволяющий проверить соответствие выбранной конфигурации требуемому пороговому режиму и рабочему диапазону тока. Затем без повторного ввода исходных данных рассчитываются малосигнальные и частотные показатели, что делает исследование целостным и исключает расхождения между отдельными стадиями вычислений.

Отдельного внимания заслуживает выбор среды *Wolfram Mathematica*. Использование данной платформы позволяет объединить в одном файле аналитическое описание модели, символьное и численное дифференцирование, визуализацию результатов и процедуру оптимизации. В результате программный комплекс выступает не только как вычислительный модуль, но и как инструмент интерактивного исследования, пригодный для быстрого сравнения проектных вариантов и подготовки расчетно-графических материалов для последующей конструкторской проработки.

Результаты вычислительных экспериментов

Первый вычислительный эксперимент посвящен исследованию статических характеристик модели. Семейство выходных ВАХ при различных значениях напряжения затвора представлено на рис. 1. С ростом V_{gs} ток стока закономерно увеличивается, а переход от линейной области к квазинасыщению происходит плавно. При $V_{gs} \approx -2,5$ В ток практически подавлен, что соответствует пороговому напряжению нормально-открытого (*depletion-mode*) транзистора в выбранной базовой конфигурации. На рис. 2 показана зависимость крутизны g_m от напряжения затвора при фиксированном напряжении сток-исток. Ниже порога крутизна близка к нулю, а после открытия канала возрастает и выходит на насыщение порядка 0,047 - 0,048 См, что подтверждает корректную работу гладкой модели перехода между режимами.

Форма семейства ВАХ указывает на то, что модель корректно воспроизводит не только сам факт роста тока при повышении напряжения на затворе, но и характер изменения проводимости канала в области малых и средних значений V_{ds} . Наличие плавного насыщения особенно важно для последующего вычисления производных, поскольку исключает искусственные изломы кривых. С инженерной точки зрения данный результат означает, что предложенная модель пригодна для качественной оценки режима работы транзистора в составе усилительного каскада, где необходимо одновременно анализировать токовую нагрузочную способность и устойчивость рабочей точки.

Зависимость g_m от V_{gs} дополняет статическую картину и показывает область наибольшей чувствительности прибора к управляющему воздействию. Выход крутизны на насыщение после открытия канала свидетельствует о том, что в принятой аппроксимации основное ограничение при дальнейшем росте V_{gs} определяется уже не самим процессом формирования проводящего канала, а параметрами насыщения скорости и паразитными потерями. Для предварительного проектирования такой результат полезен тем, что позволяет определить диапазон смещений, в котором целесообразно анализировать усилительные свойства GaN/AlGaN HEMT.

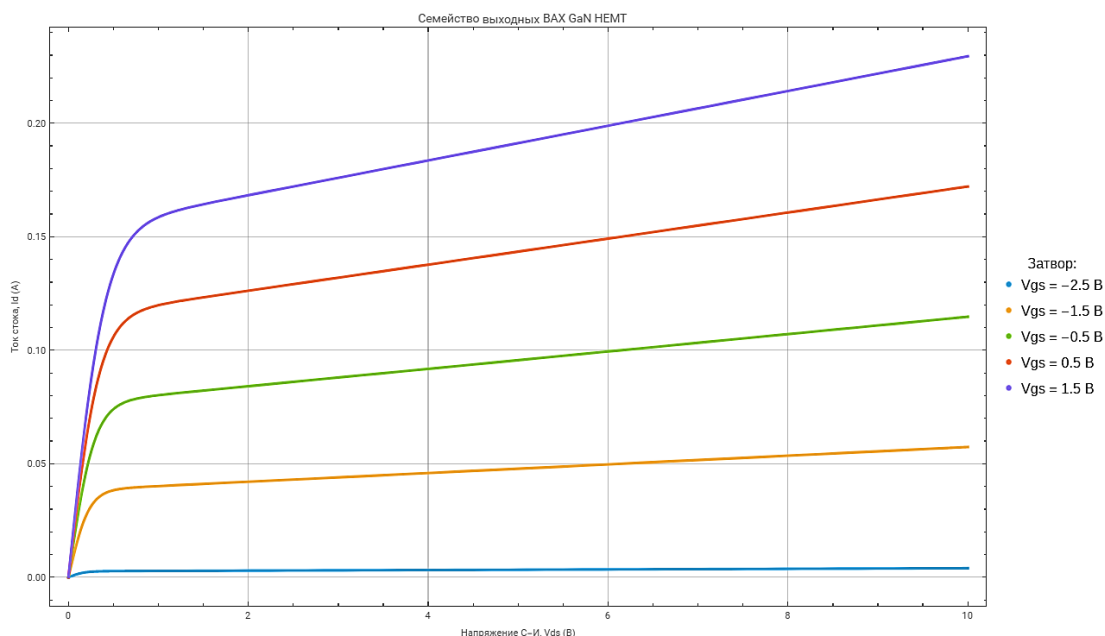


Рис. 1. Семейство выходных характеристик модели GaN/AlGaN HEMT при различных значениях напряжения затвора

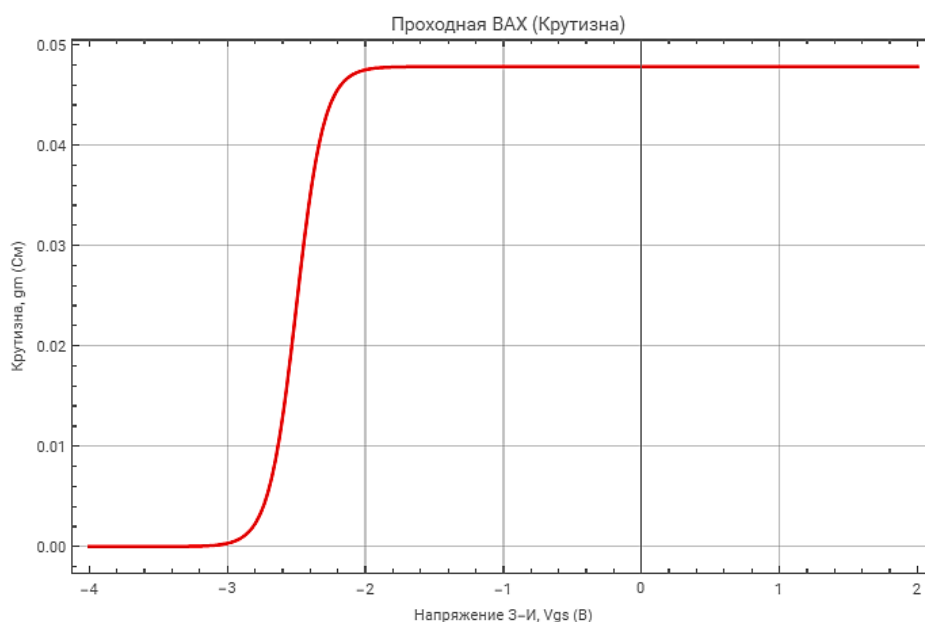


Рис. 2. Зависимость крутизны g_m от напряжения затвора при фиксированном напряжении сток-исток

Во втором эксперименте выполнено параметрическое исследование порогового напряжения в координатах «мольная доля Al – толщина барьера AlGaIn». Полученная карта, приведенная на рис. 3, показывает, что увеличение содержания алюминия и одновременное утолщение барьерного слоя смещают V_{th} в более отрицательную область. В рамках принятой аппроксимации влияние мольной доли Al выражено сильнее, чем влияние толщины барьера, что делает состав сплава удобным проектным параметром для первичной подстройки режима отсечки.

Практический смысл карты V_{th} состоит в том, что она может использоваться как проектная номограмма для выбора структуры под требуемый режим управления. Более сильное влияние мольной доли Al объясняется тем, что именно состав барьерного слоя в наибольшей степени определяет уровень поляризационного заряда и, следовательно, концентрацию двумерного электронного газа на границе раздела. Толщина барьера также существенно влияет на порог, однако в исследуемом диапазоне ее воздействие оказывается менее резким. Это позволяет рассматривать x_{Al} как основной параметр грубой настройки, а толщину d_{AlGaIn} как параметр более тонкой корректировки режима отсечки.

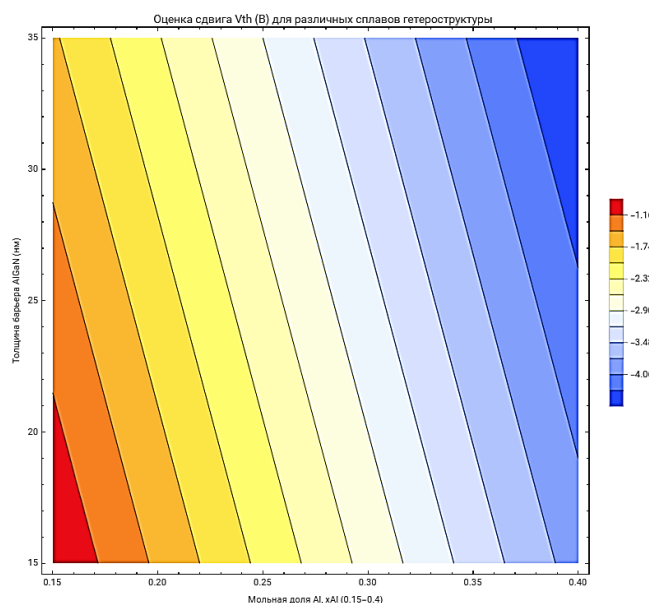


Рис. 3. Карта распределения порогового напряжения V_{th} в зависимости от мольной доли Al и толщины барьерного слоя AlGaIn

Третий эксперимент демонстрирует влияние температуры канала на высокочастотные характеристики. Как видно из рис. 4, повышение температуры от 300 до 600 К приводит к уменьшению предельной частоты f_T примерно с 66 до 46 ГГц и максимальной частоты генерации f_{MAX} примерно с 130 до 110 ГГц. Такой характер изменения согласуется с принятым в модели снижением подвижности носителей и скорости насыщения при росте температуры. Следовательно, тепловой режим является одним из ключевых факторов, ограничивающих СВЧ-потенциал GaN/AlGaN HEMT.

С точки зрения радиотехнического применения полученные кривые подтверждают, что даже для приборов на основе GaN, традиционно считающихся устойчивыми к повышенным температурам, тепловой режим остается определяющим фактором сохранения СВЧ-потенциала. Наиболее заметно деградирует величина f_T , поскольку она прямо связана с транс-кондуктивностью канала и суммарной входной емкостью. Частота f_{MAX} уменьшается медленнее, однако и ее спад является принципиально важным для генераторных и усилительных схем миллиметрового диапазона. Следовательно, при практическом использовании подобных транзисторов вопросы теплоотвода и стабилизации рабочей температуры должны рассматриваться как часть общей задачи проектирования.

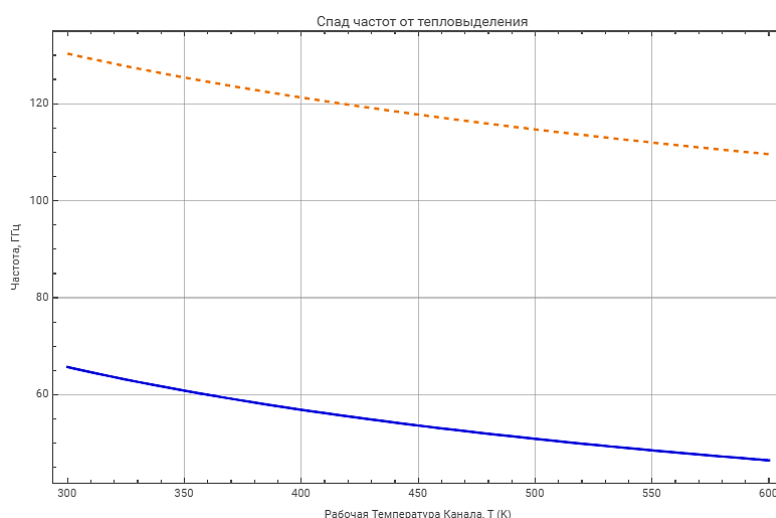


Рис. 4. Зависимости предельной частоты f_T и максимальной частоты генерации f_{MAX} от температуры канала

Четвертый эксперимент посвящен масштабированию длины затвора. На рис. 5 показано, что уменьшение L_g от 1,0 до 0,05 мкм повышает предельную частоту f_T приблизительно с 20 до 115 ГГц. Наиболее резкий рост наблюдается при переходе в субмикронную область, что соответствует уменьшению времени пролета носителей через канал. Вместе с тем при минимальных длинах затвора выигрыш становится менее линейным, поскольку возрастает роль паразитных сопротивлений и емкостей.

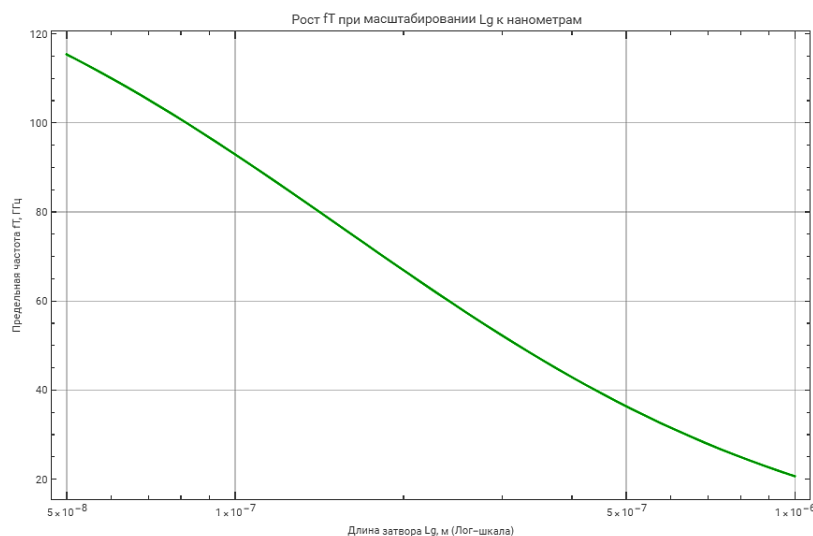


Рис. 5. Зависимость предельной частоты f_T от длины затвора L_g в логарифмической шкале

Полученная зависимость хорошо согласуется с общими представлениями о роли длины затвора в быстродействующих транзисторах. Сокращение длины канала уменьшает время пролета носителей и увеличивает предельную частоту усиления по току, однако одновременно повышает требования к качеству затворной литографии, омических контактов и контролю паразитных элементов. Именно поэтому наименьшие значения L_g не всегда автоматически означают наилучший итоговый компромисс в реальной технологии. Тем не менее результаты моделирования однозначно показывают, что переход в субмикронный и нанометрический диапазон является главным направлением повышения частотного потенциала исследуемых структур.

Пятый эксперимент реализует оптимизационный поиск компромиссной радиочастотной гетероструктуры по критерию максимума f_T при фиксированной длине затвора 0,15 мкм. В качестве ограничений заданы допустимый диапазон порогового напряжения от -3,5 до -1,5 В, толщина барьера 15–35 нм и диапазон мольной доли алюминия 0,15 - 0,40. Полученный результат, показанный на рис. 6, соответствует области $d \approx 15$ нм и $x_{Al} \approx 28,3$ %, при которых прогнозная предельная частота составляет около 97,8 ГГц, а пороговое напряжение сохраняется на уровне около -2,50 В. Таким образом, оптимизация подтверждает целесообразность уменьшения толщины барьера при сохранении умеренной доли алюминия.

Важно отметить, что найденное решение следует интерпретировать не как единственную точку оптимума, а как рациональную область параметров в рамках выбранной модели и набора ограничений. То обстоятельство, что алгоритм стремится к минимальной толщине барьера из допустимого диапазона, указывает на существенную роль емкостных и транзитных факторов при максимизации f_T . При этом оптимальная доля алюминия остается в умеренной области, что позволяет сохранить требуемое пороговое напряжение без чрезмерного смещения прибора в сторону глубокого обеднения. Такой результат хорошо согласуется с выводами предыдущего параметрического анализа и подтверждает внутреннюю согласованность программного комплекса.

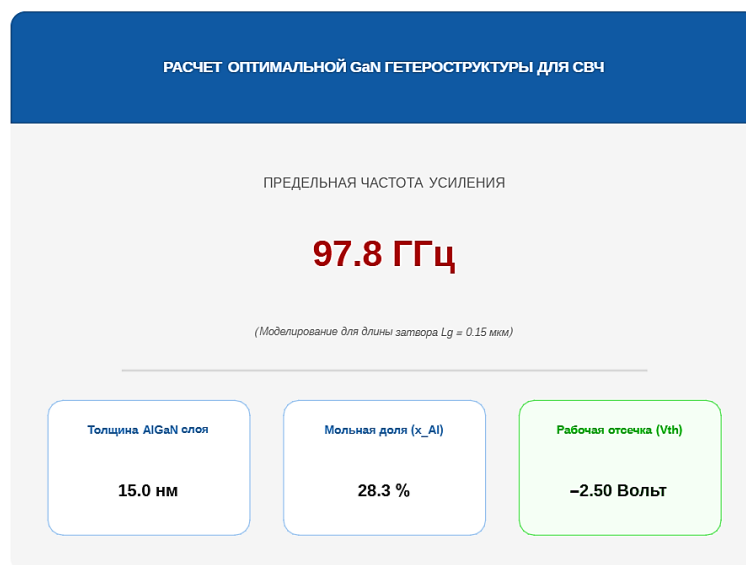


Рис. 6. Результаты оптимизации параметров гетероструктуры GaN/AlGaIn HEMT по критерию максимума предельной частоты f_T

Следует отметить, что разработанный программный комплекс предназначен прежде всего для инженерной оценки и предварительного выбора параметров структуры. Модель не является полной TCAD-реализацией и не учитывает самосогласованный электротепловой расчет, токовый коллапс, утечки затвора, пробой и ловушечные эффекты. Тем не менее она обеспечивает устойчивое и наглядное параметрическое исследование, что делает ее полезной для учебных задач, быстрого скрининга проектных решений и подготовки исходных данных для более детального моделирования.

Несмотря на указанные ограничения, предложенный подход обладает важным методическим преимуществом: он позволяет в единой вычислительной среде быстро связать между собой параметры гетероструктуры, режимы смещения и высокочастотные показатели прибора. Для учебных и исследовательских задач такая форма представления особенно ценна, поскольку делает физический смысл отдельных параметров прозрачным и дает возможность пошагово проследить, как изменение одного

технологического фактора отражается на итоговом радиочастотном результате. Тем самым программный комплекс может рассматриваться как промежуточное звено между чисто теоретическими моделями и более ресурсоемкими средствами детального приборно-технологического моделирования.

Заключение

Разработан программный комплекс в среде *Wolfram Mathematica* для параметрического моделирования и оптимизации GaN/AlGaN HEMT. Комплекс позволяет рассчитывать статические выходные характеристики, крутизну, пороговое напряжение и высокочастотные параметры f_T и f_{MAX} , а также выполнять целевую оптимизацию гетероструктуры по заданному критерию.

По результатам вычислительных экспериментов установлено, что повышение температуры канала существенно ухудшает частотные параметры транзистора, масштабирование длины затвора остается основным механизмом повышения быстродействия, а наиболее рациональная область параметров для рассматриваемой модели при длине затвора 0,15 мкм соответствует барьеру AlGaIn толщиной около 15 нм и мольной доле Al около 28,3 %. Полученные результаты могут быть использованы при предварительном проектировании СВЧ-узлов на основе GaN/AlGaIn HEMT и дальнейшей разработке более детальных моделей прибора.

Разработанная структура статьи и самого программного комплекса показывает, что использование компактных аналитических моделей в среде *Wolfram Mathematica* является эффективным способом предварительной оценки GaN/AlGaIn HEMT для СВЧ-применений. В дальнейшем модель может быть расширена за счет включения более детального описания паразитных емкостей, самосогласованного электротеплового расчета и сопоставления с экспериментальными характеристиками реальных приборов, что позволит повысить точность прогноза без потери удобства параметрического анализа.

Список использованных источников

1. Ambacher O., Smart J., Shealy J. R. et al. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures // *Journal of Applied Physics*. 1999. Vol. 85, no. 6. P. 3222–3233.
2. Mishra U. K., Parikh P., Wu Y.-F. AlGaIn/GaN HEMTs—An overview of device operation and applications // *Proceedings of the IEEE*. 2002. Vol. 90, no. 6. P. 1022–1031.
3. Medjdoub F., Shinohara K., Thome F. et al. Emerging GaN Technologies for Next-Generation Millimeter-Wave Applications // *IEEE Microwave Magazine*. 2024. Vol. 25, no. 10. P. 18–37.
4. Meneghini M., Tazzoli A., Ronchi N. et al. Reliability issues of gallium nitride high electron mobility transistors // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2010. Vol. 2, no. 1. P. 39–50.
5. Li L., Nomoto K., Pan M. et al. GaN HEMTs on Si with regrown contacts and cutoff/maximum oscillation frequencies of 250/204 GHz // *IEEE Electron Device Letters*. 2020. Vol. 41, no. 5. P. 689–692.
6. Teo K. H., Egawa T., Ueda T. et al. Emerging GaN technologies for power, RF, digital, and quantum applications // *Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 130, no. 16. Art. 160902.