

УДК 00

Моделирование hemt-транзистора в программном комплексе tcad sentaurus

09, сентябрь 2012

Паршина А.А.

*Научный руководитель: д.т.н., профессор Зинченко Л.А.
МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра ИУ4, Москва, Российская Федерация*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Введение

Развитие радиолокационной, связной и навигационной техники требует создания дискретных полупроводниковых приборов, применение которых позволит повысить энергетический потенциал твердотельной передающей РЭА, а, следовательно, дальность ее действия, разрешающую способность и надежность функционирования.

Наиболее широко применяемым в настоящее время материалом для создания активных элементов передающих устройств в сантиметровых и миллиметровых диапазонах длин волн является арсенид галлия. Гетероструктурные полевые транзисторы с модулированным легированием (ПТМЛ, modulation doped field effect transistor, MODFET) на основе тройных и четверных соединений полупроводниковых материалов групп $A^{III}B^V$ в настоящее время являются самыми быстродействующими полевыми транзисторами, позволяя одновременно достигать наименьшие коэффициенты шума в гигагерцовом диапазоне частот. Высокое быстродействие достигается за счет эффекта увеличения дрейфовой скорости электронов, образующих двумерный электронный газ. Поэтому другими названиями, отражающими особенности работы ПТМЛ являются транзистор с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT) и транзистор с двумерным электронным газом (two-dimensional electron gas transistor, TEGFET) [7].

Принцип работы HEMT-транзистора и особенности его структуры

HEMT-транзистор - полевой транзистор, в котором для создания канала вместо легированной области, в отличие от обычных МОП-транзисторов, используется контакт двух полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны (т. н. гетеропереход). Общеиспользуемым материалом для HEMT является комбинация GaAs и AlGaAs, хотя возможны и значительные вариации в зависимости от назначения устройства. Например, приборы с повышенным содержанием индия в общем случае показывают лучшую производительность на высоких частотах, в то время как в последние годы наблюдается массовый рост научно-исследовательских разработок HEMT на нитриде галлия (GaN), в связи с их лучшей производительностью при высоких мощностях. Существует достаточно много изоструктурных аналогов GaAs — полупроводниковых материалов, имеющих близкий к GaAs шаг кристаллической решетки. Это позволяет использовать GaAs в качестве основы для создания широкого класса гетероструктурных транзисторов, обладающих уникальными характеристиками.

Обычно для создания гетероперехода выбираются материалы с одинаковым параметром кристаллической решётки (расстояниями между атомами). В реальности практически невозможно подобрать пару разных полупроводников, у которых было бы идеальное согласование и кристаллических структур, и коэффициентов термического расширения[5]. Поэтому на границе раздела гетероперехода обычно возникают механические напряжения, вызывающие появление дислокаций несоответствия, создающих на границе раздела граничные состояния. Даже у такой хорошо согласующейся пары как Ge и GaAs присутствует пластическая деформация. Поэтому для создания структуры используются твердые растворы. Например, замена Ge на твердый раствор $\text{Ge}_{0,98}\text{Si}_{0,02}$ приводит к снижению напряжений на границе раздела до уровня, исключаяющего возможность пластической деформации GaAs, и улучшает характеристики гетероперехода — у него резко уменьшается обратный ток.

В НЕМТ транзисторах чаще всего применяют гетеропереход $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [6]. Величина x показывает относительное содержание Al. С ростом x плавно увеличивается ширина запрещенной зоны ΔE_z $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Например, при изменении x в пределах 0-0,4 ширина запрещенной зоны ΔE_z линейно увеличивается от 1,42 до 1,92 эВ. Для состава с $x = 0,3$ $\Delta E_z = 1,8$ эВ и различие в ширине запрещенной зоны составляет $\sim 0,38$ эВ. Вследствие хорошего соответствия кристаллических решеток GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в гетеропереходе обеспечивается низкая плотность поверхностных состояний и дефектов. По этим причинам для электронов, накопленных в области накопления затвора, в слабых электрических полях достигается очень высокая подвижность, близкая к объемной подвижности для нелегированного GaAs [$(8..9) \times 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T = 300 \text{ К}$]. Причём, эта подвижность резко увеличивается при понижении температуры, так как в нелегированном GaAs преобладает решетчатое рассеяние [1].

Также подвижность электронов в канале увеличивается благодаря дополнительной прослойке (спейсеру) между каналом GaAs и барьером AlGaAs. Спейсер — тонкий (несколько нм) разделительный слой нелегированного $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Он способствует лучшему пространственному разделению двумерного электронного газа и рассеивающих центров между нелегированным GaAs и легированным донорами $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Концентрация рассеивающих центров в нелегированном слое ниже, чем в легированном, поэтому подвижность электронов, накопленных в области насыщения затвора, дополнительно увеличивается. В этом случае волновая функция электронов в канале не проникает в барьер, а затухает в спейсере. При этом уменьшается рассеяние носителей на барьере. Введение спейсера также улучшает омический контакт, что приводит к повышению предельной рабочей частоты почти до теоретического предела.

В общем случае для создания проводимости в полупроводниках, в них добавляются легирующие примеси для генерации подвижных электронов. Однако эти электроны замедляются в первую очередь при столкновении с примесями, используемыми для их генерации. В НЕМТ этого удастся избежать за счет того, что электроны с высокой подвижностью генерируются на гетеропереходе в области контакта высоколегированного донорного слоя N-типа с широкой запрещенной зоной (в нашем примере AlGaAs) и нелегированного канального слоя с узкой запрещенной зоной без каких-либо легирующих примесей (в данном случае GaAs). На рис.1 показана зонная диаграмма НЕМТ-транзистора.

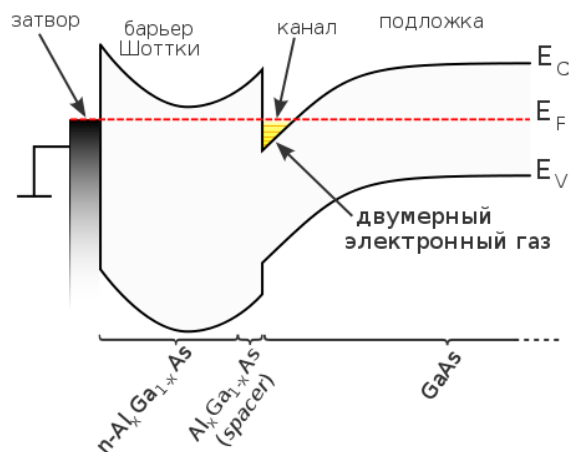


Рис. 1 Зонная диаграмма НЕМТ-транзистора [5]

Электроны, образующиеся в тонком слое n-типа, полностью перемещаются в слой GaAs, тем самым, создавая обеднение AlGaAs. Обеднение происходит из-за того, что в гетеропереходе между материалами с разной шириной запрещенной зоны образуется [квантовая яма](#) (крутой провал) в зоне проводимости со стороны нелегированного слоя GaAs, где электроны способны быстро передвигаться без столкновений с примесями. В результате того, что электроны не в состоянии покинуть квантовую яму, образуется очень тонкая прослойка с большой концентрацией высокоподвижных электронов, поэтому сопротивление канала очень низкое (или, по другому, подвижность носителей высока). Эта прослойка называется двумерным электронным газом. Также как в других типах полевых транзисторов, приложенное к затвору НЕМТ напряжение изменяет проводимость этого слоя.

Моделирование СВЧ-транзистора

Рассматриваются вопросы моделирования генераторного СВЧ-транзистора, изготовленного на основе псевдоморфной гетероструктуры, состав которой приведен в таблице 1.

Моделирование производится с помощью программного пакета TCAD Sentaurus [2,3]. Для получения структуры использованы три модуля TCAD Sentaurus: DIOS, Ligament Flow Editor и Ligament Layout [2 - 4]. С помощью программ Ligament генерируется командный файл для DIOS.

В Ligament Flow Editor был смоделирован технологический процесс изготовления транзистора. При этом были использованы следующие операции:

- deposit – осаждение;
- etch – травление;
- pattern – наложение маски;
- anneal – отжиг;
- implant – легирование.

В процессе моделирования технологического процесса материалы, приведенные в таблице, заменялись материалами из имеющихся в библиотеке Ligament Flow. В дальнейшем этим материалы будут заменены на нужные с помощью программы Sentaurus Structure Editor.

Таблица 1. Конструкция гетероструктуры

Слой транзисторной гетероструктуры, назначение	Состав (x_{AlAs} , y_{InAs})
Полуизолирующая GaAs подложка	
1-ый буферный слой GaAs	
2-ой буферный слой GaAs (низкотемпературный)	
Сверхрешетка $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$	0.22/0.0
3-ий буферный слой AlGaAs	
Сильно легированный n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.22
Спейсер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.22
Сглаживающий слой GaAs	
Канал $\text{InyGa}_{1-y}\text{As}$	0.16-0.18
Сглаживающий слой GaAs	
Спейсер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.22
Сильно легированный n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.22
Барьерный слой n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.22
Барьерный слой n-GaAs	
Градиентный слой n-GaAs	
Контактный слой n-GaAs	

На рис. 2 приведен получившийся технологический процесс.

Variables & Macros										Arguments				
Unfolded Flow										Name			Type	Value
Names	Arg	Value	Arg	Value	Arg	Value	Arg	Value						
deposit	material	silicon	thickness	200 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	silicon	thickness	200 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	poly	thickness	22 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	poly	thickness	100 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	poly	thickness	4.5 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	poly	thickness	2 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	silicon	thickness	3 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	silicide	thickness	12 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	silicon	thickness	1.5 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	poly	thickness	2 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	poly	thickness	16 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	poly	thickness	13 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	silicon	thickness	15 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	silicon	thickness	20 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	layer	1	polarity	light_field	dopant	default	concentration	default						
etch	material	silicon	thickness	51 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	21 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	16 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	poly	thickness	14 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	poly	thickness	17 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	poly	thickness	3 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	2 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicide	thickness	13 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	4 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	poly	thickness	3 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	poly	thickness	5 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	poly	thickness	101 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	poly	thickness	23 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	201 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	71 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
implant	species	boron	dose	6.25e12 /cm2	energy	100 keV	tilt	7 deg						
deposit	material	resist	thickness	2 um	etch_type	strip	overetch	0						
deposit	material	oxide	thickness	150 nm	dopant	default	concentration	default						
deposit	material	nitride	thickness	100 nm	dopant	default	concentration	default						
etch	layer	2	polarity	dark_field	dopant	default	concentration	default						
etch	material	nitride	thickness	101 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	oxide	thickness	151 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	resist	thickness	1 um	strip	overetch	0							
pattern	layer	3	polarity	dark_field	thickness	1 um	side	front						
etch	material	nitride	thickness	800 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	oxide	thickness	600 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	151 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	resist	thickness	2 um	etch_type	strip	overetch	0						
deposit	material	metal	thickness	350 nm	dopant	default	concentration	default						
etch	layer	3	polarity	light_field	dopant	default	concentration	default						
etch	material	metal	thickness	700 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	resist	thickness	1 um	etch_type	strip	overetch	0						
pattern	time	50 sec	temperature	420 degC	pressure	1 atm	nitrogen	100 %						
etch	layer	4	polarity	dark_field	thickness	1 um	side	front						
etch	material	nitride	thickness	101 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	oxide	thickness	151 nm	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	silicon	thickness	710 angstr	etch_type	anisotropic	overetch	0						
etch	material	resist	thickness	1 um	etch_type	strip	overetch	0						
deposit	material	metal	thickness	450 nm	dopant	default	concentration	default						

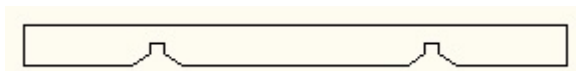


Рис. 3 Фотошаблон №1 (мезаструктура)



Рис. 4 Фотошаблон №2 (затвор и контактные площадки)

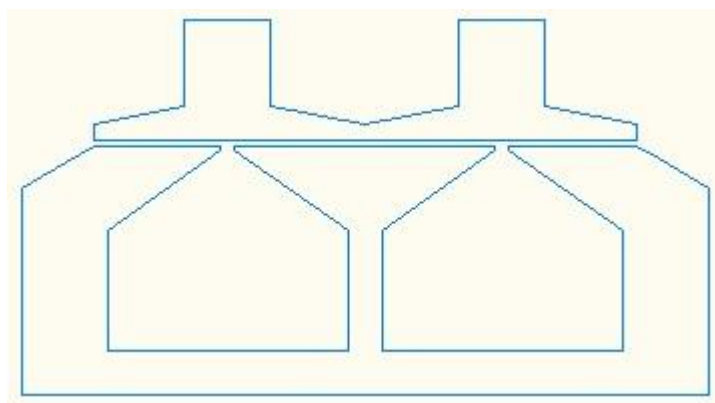


Рис. 5 Фотошаблон №3 (сток, исток)

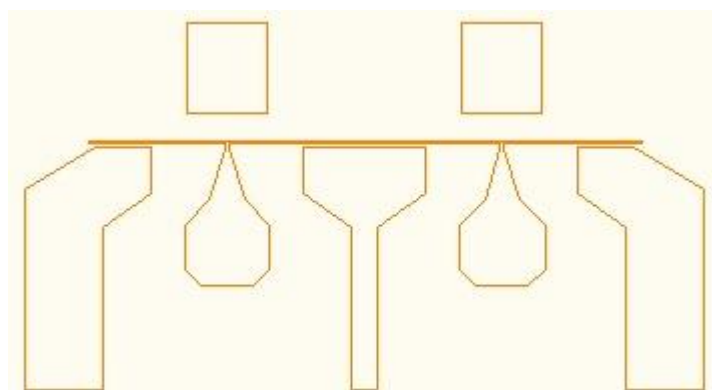


Рис. 6 Фотошаблон №4 (затвор и контактные площадки)

Полученная в программе Ligament Layout топология транзистора показана на рис. 7. Толстая черная линия на рис.7 показывает сечение, в котором будет производиться расчет.

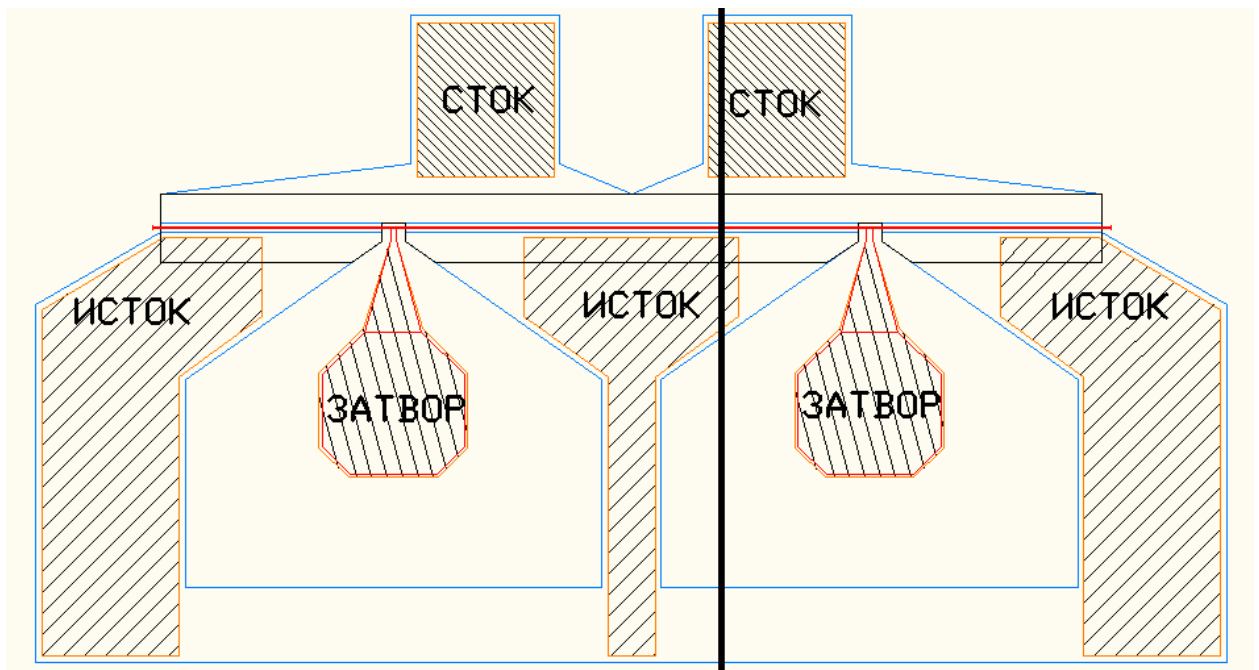


Рис. 7 Топология транзистора

Далее с помощью программы DIOS строилась структура на основе технологического процесса и комплекта фотошаблонов.

Заключение

В ходе работы исследованы особенности работы модулей программного комплекса TCAD Sentaurus. Смоделирован технологический маршрут изготовления транзистора в программном комплексе TCAD Sentaurus. Подготовлен комплект фотошаблонов для изготовления транзистора в программном комплексе TCAD Sentaurus. Получена структура транзистора в программном комплексе TCAD Sentaurus.

В дальнейшем планируется заменить материалы мезаструктуры в программе Sentaurus Structure Editor, отредактировать сетку в оболочке Mesh, написать командный файл в программе Sentaurus Device, получить электрические характеристики.

Литература

1. Я. А. Федотов, А. А. Щука. Транзисторы СВЧ-диапазона. - URL: <http://w-rabbit.narod.ru/elektr/element.htm>.
2. С.В. Калинин, А.С. Черкаев, В.Е. Зырянов, Е.А. Макаров «Моделирование нанотранзисторов в системе TCAD Sentaurus».-Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010.
3. В.В. Асессоров, Г.В. Быкадорова, А.Ю. Ткачев. Моделирование полевых полупроводниковых приборов в САПР ISE TCAD: Учебное пособие. - Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2007. - 27 с.
4. С.Александров, А.Алексеев. Субмикронная контактная металлизация. Выбор технологии // Наноиндустрия. – 2009, №6.
5. Zee S.M. Physics of semiconductor devices / S.M. Zee, Kwok K.Ng.-3-rd edition. - Canada.: A John Wiley and sons, inc., 2007.
6. А.А. Щука Электроника: Учебное пособие. – Петербург: Изд-во «БХВ-Петербург», 2005. – 800 с.