

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 24362

(13) С1

(45) 2024.08.20

(51) МПК

H 01L 29/737 (2006.01)

(54) **НОРМАЛЬНО ЗАКРЫТЫЙ НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫЙ
ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЙ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С СИСТЕМОЙ
ТЕПЛОТВОДА НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА И НИТРИДА БОРА**

(21) Номер заявки: а 20220173

(22) 2022.06.29

(43) 2024.02.28

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Волчѣк Владислав Сергеевич; Стемпицкий Виктор Романович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) RU 2581726 С1, 2016.

ВОЛЧѢК В.С. и др. Нитрид-галлиевый транзистор с высокой подвижностью электронов с эффективной системой теплоотвода на основе графена. Доклады БГУИР, 2020, Т. 18, № 3, с. 72-80.

RU 209768 U1, 2022.

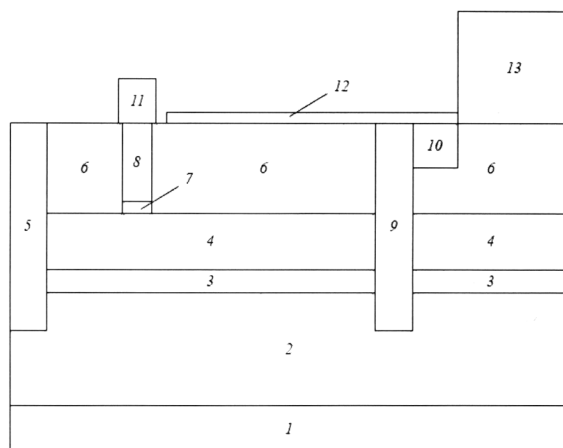
RU 2534002 С1, 2014.

RU 2222845 С1, 2004.

ВУ 12637 U, 2021.

(57)

Нормально закрытый нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор, содержащий высокоомную подложку, осажденную на высокоомной подложке гетероэпитаксиальную структуру на основе нитрида галлия, нанесенные на гетероэпитаксиальную структуру и пространственно разделенные между собой электроды, включающие исток, затвор и сток, нанесенные на гетероэпитаксиальную структуру слой пассивации на основе оксида кремния и сформированный на верхней поверхности слоя пассивации за стоком теплопоглощающий элемент, **отличающийся** тем, что в углублении в слое пассивации



Фиг. 1

ВУ 24362 С1 2024.08.20

между стоком и теплопоглощающим элементом расположен теплоотводящий элемент на основе нитрида бора, а между теплопоглощающим элементом и затвором, не соприкасаясь с последним, расположен теплоотводящий элемент на основе графена, включающий от 1 до 10 слоев.

Изобретение относится к области твердотельной электроники, в частности к конструкции гетероструктурного полевого транзистора, и может быть использовано в качестве элемента при создании интегральных микросхем силовой и сверхвысокочастотной электроники.

Приборы твердотельной электроники на основе широкозонных полупроводников, в том числе нитрида галлия, используются в радиолокационных станциях, средствах радиоэлектронной борьбы, базовых станциях беспроводной связи, мобильных телефонах, бортовых системах космических аппаратов. Благодаря широкой запрещенной зоне нитрида галлия 3,43 эВ, гетероструктурные полевые транзисторы на его основе способны выдерживать по крайней мере в течение 90 мин повышенные вплоть до 420 °С температуры, вызванные как эффектом саморазогрева, так и внешними условиями. Тем не менее уже при температуре 240 °С нижняя граница доверительного интервала с вероятностью 0,9 средней наработки до отказа равна всего 10^4 ч. Приемлемая же для массового производства средняя наработка до отказа, равная 10^6 ч, достигается при рабочей температуре около 180 °С. При фиксированной разнице между температурой в области проводящего канала и температурой корпуса прибора рассеиваемая мощность и, следовательно, выходная мощность определяются способностью транзистора отводить тепло. По этой причине отведение тепла является наиболее эффективным способом увеличения выходной мощности и улучшения надежности прибора.

Область максимальной температуры в структуре нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора образуется, как правило, около затвора со стороны стока. Для снижения температуры необходимо создать дополнительный, помимо подложки, канал для отведения тепла. Теплоотводящий элемент должен быть изготовлен из материала с наибольшим коэффициентом теплопроводности и располагаться как можно ближе к области максимальной температуры. Наиболее подходящим материалом для теплоотводящего элемента является графен, состоящий из 1-10 слоев. Для нейтрализации статических и динамических поверхностных состояний, обусловленных оборванными связями на поверхности, адсорбированными ионами и зарядами остаточных материалов, на поверхности гетероэпитаксиальной структуры требуется пассивация. Одним из наиболее популярных материалов пассивации для нитридов элементов третьей группы является оксид кремния, характеризующийся очень малым коэффициентом теплопроводности, равным 1,38 Вт/(м·К). Слой пассивации на основе оксида кремния, толщина которого может достигать несколько сотен нанометров, действует как барьер между областью максимальной температуры и теплопоглощающим элементом, сформированным на верхней поверхности структуры за стоком. Формирование углубления в слое пассивации между стоком и теплопоглощающим элементом и осаждение слоя диэлектрического материала с большим коэффициентом теплопроводности могут способствовать созданию канала для отведения тепла от области максимальной температуры к теплопоглощающему элементу. Одним из подходящих для этой задачи диэлектрических материалов является нитрид бора, коэффициент теплопроводности которого превышает значение 800 Вт/(м·К).

Известна конструкция мощного сверхвысокочастотного гетероструктурного полевого транзистора с теплоотводящими элементами на основе алмазных пленок [1]. Теплоотводящие элементы расположены между подложкой и гетероэпитаксиальной структурой, а также на верхней поверхности гетероэпитаксиальной структуры. При этом теплоотводящий элемент, расположенный между подложкой и гетероэпитаксиальной структурой, со-

стоит из двух пленок, первая из которых формируется с помощью каталитического осаждения из газовой фазы, а вторая - с помощью осаждения из газовой фазы, активизированного сверхвысокочастотной плазмой. Коэффициент теплопроводности алмазной пленки, полученной методом каталитического осаждения из газовой фазы, находится в пределах от 800 до 1000 Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности алмазной пленки, полученной методом осаждения из газовой фазы, активизированного сверхвысокочастотной плазмой, составляет 1500 Вт/(м·К). Теплоотводящие элементы, расположенные на поверхности гетероэпитаксиальной структуры между электродами, наносятся с помощью осаждения из газовой фазы, активизированного сверхвысокочастотной плазмой. Недостатками изделия на основе указанной конструкции являются, во-первых, усложнение технологического маршрута его изготовления из-за введения дополнительных технологических операций, необходимых для повышения адгезии между теплоотводящим элементом и гетероэпитаксиальной структурой, во-вторых, использование в процессе формирования прибора достаточно сложной и дорогостоящей технологии осаждения алмазных пленок, в-третьих, отсутствие слоев пассивации на поверхности гетероэпитаксиальной структуры. По этим причинам такая технология малоприменима для массового производства.

Кроме алмазных пленок перспективным материалом для теплоотводящего элемента является графен, коэффициент теплопроводности которого может достигать значения 5000 Вт/(м·К). Известна конструкция мощного сверхвысокочастотного гетероструктурного полевого транзистора с теплоотводящими элементами на основе графена [2]. Теплоотводящие элементы расположены между подложкой и гетероэпитаксиальной структурой, а также между гетероэпитаксиальной структурой и подзатворным диэлектриком. Недостатками изделия на основе указанной конструкции являются, во-первых, усложнение технологического маршрута его изготовления из-за введения дополнительных технологических операций, необходимых для повышения адгезии между теплоотводящим элементом и гетероэпитаксиальной структурой, во-вторых, ухудшение эксплуатационных характеристик вследствие появления токов утечки через теплоотводящий элемент, расположенный между подложкой и гетероэпитаксиальной структурой.

Наиболее близким аналогом (прототипом) заявленного изобретения является конструкция мощного сверхвысокочастотного гетероструктурного полевого транзистора на основе нитрида галлия [3], сформированного на высокоомной кремниевой подложке и состоящего из осажденной на подложку гетероэпитаксиальной структуры на основе нитридов элементов третьей группы, нанесенных на гетероэпитаксиальную структуру и пространственно разделенных между собой электродов, включающих исток, затвор и сток, нанесенных на гетероэпитаксиальную структуру между электродами слоев пассивации на основе нитрида кремния, сформированного на гетероэпитаксиальной структуре теплопоглощающего элемента и соединяющего сток с теплопоглощающим элементом теплоотводящего элемента на основе графена. Недостатком такой конструкции является то, что теплоотводящий элемент отделен от области максимальной температуры слоем пассивации на основе нитрида кремния, характеризующегося малым коэффициентом теплопроводности, равным 18,5 Вт/(м·К).

Предлагаемое изобретение направлено на улучшение электрических и частотных характеристик нормально закрытого нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора.

Технический результат достигается тем нормально закрытый нитрид-галлиевый гетероструктурный полевой транзистор сформирован на высокоомной подложке и состоящем из осажденной на подложку гетероэпитаксиальной структуры на основе нитрида галлия, нанесенных на гетероэпитаксиальную структуру и пространственно разделенных между собой электродов, включающих исток, затвор и сток, нанесенных на гетероэпитаксиальную структуру слоев пассивации на основе оксида кремния и сформированного на верх-

ней поверхности слоя пассивации за стоком теплопоглощающего элемента, расположенного в углублении в слое пассивации между стоком и теплопоглощающим элементом теплоотводящего элемента на основе нитрида бора, а между теплопоглощающим элементом и затвором, не соприкасаясь с последним, расположенного теплоотводящего элемента на основе графена, состоящего из 1-10 слоев. Режим обогащения обеспечен с помощью внедрения слоя нитрида алюминия-галлия, легированного дырочной примесью, между затвором и барьерным слоем.

Улучшение электрических и частотных характеристик нормально закрытого нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора достигается благодаря созданию дополнительного, помимо подложки, канала для отведения тепла от области максимальной температуры к теплопоглощающему элементу, что позволяет уменьшить температуру в проводящем канале, не увеличивая токи утечки. При этом теплоотводящий элемент на основе нитрида бора направлен на улучшение, в первую очередь, электрических характеристик, а теплоотводящий элемент на основе графена - на улучшение частотных характеристик.

На фиг. 1 показан пример реализации предложенного нормально закрытого нитрид-галлиевого гетероструктурного полевого транзистора, где 1 - подложка, 2 - буферный слой, 3 - спейсер, 4 - барьерный слой, 5 - исток, 6 - слой пассивации на основе оксида кремния, 7 - слой нитрида алюминия-галлия, легированный акцепторной примесью, 8 - нижняя часть затвора, 9 - сток, 10 - теплоотводящий элемент на основе нитрида бора, 11 - верхняя часть затвора, 12 - теплоотводящий элемент на основе графена и 13 - теплопоглощающий элемент.

Толщина подложки - 100 мкм, буферного слоя - 1,5 мкм, спейсера - 2 нм, барьерного слоя - 15 нм, слоя нитрида алюминия-галлия, легированного акцепторной примесью, - 20 нм, слоя пассивации на основе оксида кремния - 0,2 мкм, теплоотводящего элемента на основе нитрида бора - 0,1 мкм, теплоотводящего элемента на основе графена - 3,5 нм, теплопоглощающего элемента - 20 мкм. Длины истока и стока - 1 мкм. Длины нижней и верхней частей затвора - 0,5 и 0,7 мкм соответственно. Расстояние между истоком и затвором - 2 мкм, расстояние между затвором и стоком - 6 мкм. Длины теплоотводящих элементов на основе нитрида бора и графена - 1 и 7,8 мкм соответственно. Длина теплопоглощающего элемента - 5 мкм. Гетероэпитаксиальная структура состоит из слоев 2, 3, 4 и 7.

Принцип работы предлагаемого изделия заключается в следующем: в буферном слое 2 у границы со спейсером 3 образуется проводящий канал за счет формирования потенциальной ямы с треугольным профилем распределения потенциала. Слабый сигнал, подаваемый между истоком 5 и затвором 8 + 11, усиливается мощным сигналом, подаваемым между стоком 9 и затвором 8 + 11. В результате мощный сигнал, распространяющийся по проводящему каналу между истоком 5 и стоком 9, приобретает форму, аналогичную слабому сигналу, подаваемому между истоком 5 и затвором 8 + 11. Вследствие этого изделие способно усиливать мощность сигнала.

На фиг. 2 представлены сток-затворная характеристика без теплоотводящей системы на основе графена и нитрида бора 14, сток-затворная характеристика с теплоотводящей системой на основе графена и нитрида бора 15, зависимость передаточной проводимости от смещения сток-затвор без теплоотводящей системы на основе графена и нитрида бора 16, зависимость передаточной проводимости от смещения сток-затвор с теплоотводящей системой на основе графена и нитрида бора 17. Пороговое напряжение в обоих случаях равно 1,96 В.

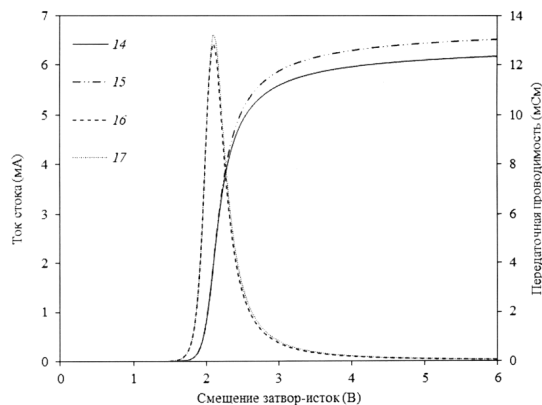
На фиг. 3 представлены сток-стоковая характеристика без теплоотводящей системы на основе графена и нитрида бора 18, сток-стоковая характеристика с теплоотводящей системой на основе графена и нитрида бора 19, зависимость максимальной температуры предлагаемого изделия от смещения сток-исток без теплоотводящей системы на основе

графена и нитрида бора 20, зависимость максимальной температуры предлагаемого изделия от смещения сток-исток с теплоотводящей системой на основе графена и нитрида бора 21. Смещение затвор-исток составляет 6 В. Осаждение в углублении в слое пассивации на основе оксида кремния между стоком и теплопоглощающим элементом теплоотводящего элемента на основе нитрида бора, а также формирование теплоотводящего элемента на основе графена, расположенного на верхней поверхности структуры между теплопоглощающим элементом и затвором, не соприкасаясь с последним, приводят к увеличению тока стока на 28,1 % и уменьшению максимальной температуры на 40,0 °С при смещении сток-исток 30 В.

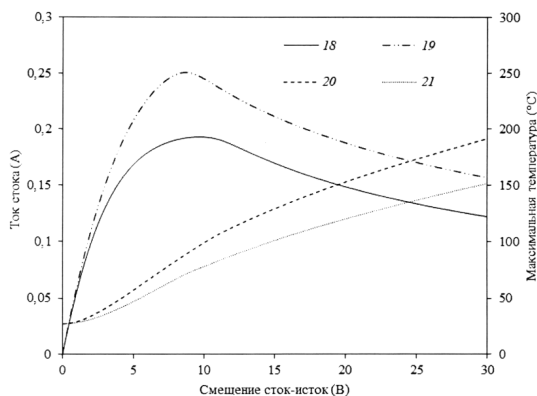
На фиг. 4 представлены частотная зависимость коэффициента усиления по току без теплоотводящей системы на основе графена и нитрида бора 22, частотная зависимость коэффициента усиления по току с теплоотводящей системой на основе графена и нитрида бора 23, частотная зависимость коэффициента однонаправленного усиления по мощности без теплоотводящей системы на основе графена и нитрида бора 24, частотная зависимость коэффициента однонаправленного усиления по мощности с теплоотводящей системой на основе графена и нитрида бора 25. При использовании теплоотводящей системы на основе графена и нитрида бора граничная частота увеличивается со значения 8,5 ГГц до значения 19,3 ГГц, максимальная частота генерации повышается со значения 18,1 ГГц до значения 99,5 ГГц.

Источники информации:

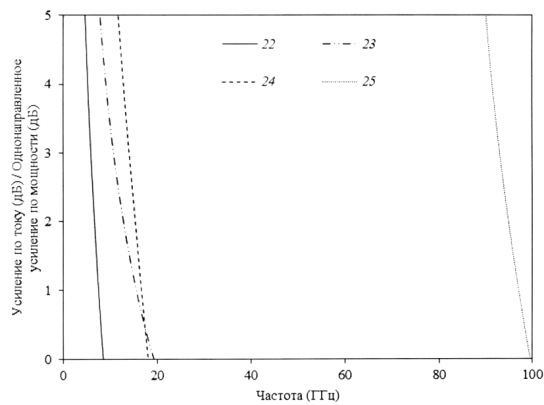
1. US 7884373 B2.
2. US 2014/0353722.
3. RU 2581726 C1.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4