

ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 11987

(13) U

(46) 2019.04.30

(51) МПК

H 01L 29/786 (2006.01)

B 82B 1/00 (2006.01)

(54)

ГРАФЕНОВЫЙ ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

(21) Номер заявки: u 20180201

(22) 2018.10.01

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

(72) Авторы: Мищенко Валерий Николаевич; Муравьев Валентин Владимирович; Павлючек Алексей Арсеньевич (ВУ)

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

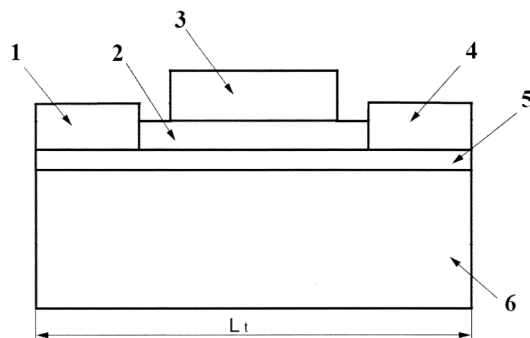
(57)

Полевой транзистор с затвором, выполненным из комбинации металлов титан/платина/золото и изолированным слоем диоксида кремния, содержащий контактные области истока и стока, выполненные из комбинации металлов титан/платина/золото, которые вместе со слоем диоксида кремния расположены на слое графена, который, в свою очередь, расположен на поверхности полупроводниковой подложки, отличающийся тем, что контактные области истока и стока полностью расположены на слое графена, а полупроводниковая подложка выполнена из материала арсенид галлия.

(56)

1. Moon J.S., Curtis D., Bui S., Hu M., Gaskill D.K., Tedesco J.L., Asbeck P., Jemigan G.G., VanMil B.L., Myers-Ward R.L., Eddy C.R., Campbell P.M., Weng X. // Top-Gated Epitaxial FETs on SiC-Face SiC Wafers with a Peak Transconductance of 600 mS/mm, IEEE Electron Device Letters. - 2010. - Vol. 31. - P. 260-262.

2. Winters M., Hassan J., Zirath H., Janzen E., Rorsman N. A temperature dependent measurement of the carrier velocity vs. electric field characteristic for as-grown and H-intercalated epitaxial graphene on SiC // Journal of applied physics. - Vol. 113. - P. 193708. - 2013.



Фиг. 1

3. Novoselov K.S., Geim A.K. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*. - Vol. 306. - P. 666-669. - 2004.
4. Morozov S.V., Novoselov, K.S., Geim A.K. Electron transport in graphene, *UFN (Успехи физических наук)*. - Vol. 178. - P. 776-780. - 2008.
5. Свинцов Д.А., Вьюрков В.В., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А., Буренков А., Охнер Р. Физика и техника полупроводников. - 2013. - Т. 47. - Вып. 2. - С. 244.
6. Babichev A.V., Gasumyants V.E., Egorov A.Yu., Vitusevich S., Tchemycheva M. Contact properties to CVD-graphene on GaAs substrates for optoelectronic applications // *Nanotechnology*. - Vol. 25. - 2014. - P. 335707.
7. Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // *Успехи физических наук*. - Т. 181. - No. 3. - 2011. - С. 235-268.
8. Chauhan Jyotsna, Guo Jing // High-field transport and velocity saturation in graphene. *Appl. Phys. Letters*. - 2009. - Vol. 95. - P. 023120.

Полезная модель относится к области микро- и нанoeлектроники, а именно к транзисторам - активным элементам на основе графена, реализующим эффект полевого управления электрическим током, и может быть использована в качестве усилительного и коммутирующего устройства в области диапазонов СВЧ и КВЧ.

Известен полевой транзистор с изолированным затвором [1]. Контактные области истока и стока транзистора выполнены из проводящего материала и частично расположены на подложке из карбида кремния и на слое графена. Затвор выполнен из проводящего материала, расположенного на слое диоксида кремния, который, в свою очередь, расположен на слое графена. Недостатком данного транзистора является невысокое значение рабочей частоты и низкое быстродействие из-за небольшой величины подвижности носителей заряда в материале карбид кремния (порядка $130 \text{ см}^2/\text{с}$) в сравнении с графеном ($20000 \text{ см}^2/\text{с}$) и арсенидом галлия ($7500 \text{ см}^2/\text{с}$) [2, 3, 4].

В качестве прототипа предлагаемой полезной модели выбран туннельный транзистор с графеновыми электродами [5]. Одной из особенностей конструкции транзистора является наличие области туннельного барьера, который формируется путем помещения в туннельный зазор кремниевой вставки. Основным недостатком данного устройства являются значительные технологические сложности при реализации его на практике. Такой транзистор требует относительно большого напряжения на затворе для осуществления его переключения. Наличие кремневой вставки приводит к снижению выходного тока и быстродействия транзистора ввиду низкой подвижности носителей заряда в кремнии, величина которой составляет приблизительно $1400 \text{ см}^2/\text{с}$ [2].

Сущностью предлагаемой полезной модели графенового полевого транзистора является то, что его контактные области истока и стока полностью расположены на слое графена, а полупроводниковая подложка выполнена из материала арсенид галлия.

На фиг. 1 представлен внешний вид конструкции заявляемого транзистора, где 1 - омический контакт истока, выполненный из комбинации металлов титан/платина/ золото, 2 - изолятор, сформированный из диоксида кремния, 3 - затвор, выполненный из комбинации металлов титан/платина/золото, 4 - омический контакт стока, выполненный из комбинации металлов титан/платина/ золото, 5 - слой графена, 6 - подложка из материала арсенид галлия, L_t - общая длина полупроводниковой структуры.

На фиг. 2 представлены полученные в результате моделирования зависимости выходного тока стока I_s от напряжения на затворе U_g , причем кривые 7 и 8 получены при использовании материала карбид кремния в качестве подложки, а кривые 9 и 10 получены при использовании материала арсенид галлия в качестве подложки.

На фиг. 3 представлена полученная в результате моделирования зависимость выходного тока стока I_s от особенностей расположения слоя графена относительно истока транзистора.

На фиг. 4 представлена полученная в результате моделирования зависимость выходного тока стока I_s от особенностей расположения слоя графена относительно стока транзистора.

В заявляемом полевом транзисторе с затвором, выполненным из комбинации металлов титан/платина/золото и изолированным слоем диоксида кремния, содержащим контактные области истока и стока, выполненные из комбинации металлов титан/платина/золото, которые вместе со слоем диоксида кремния полностью расположены на слое графена, который, в свою очередь, расположен на поверхности полупроводниковой подложки, выполненной из материала арсенида галлия. Затвор расположен над областью переноса носителей заряда между областями истока и стока. В заявляемой конструкции транзистора при инжекции носителей заряда из контактных областей все электроны попадают в слой графена, где достигают высокой скорости дрейфа, равной скорости Ферми, величина которой приблизительно равна $1 \cdot 10^8$ см/с [8]. Далее дрейф электронов продолжается как в слое графена, так и в подложке, в зависимости от их расположения, а также от величины и направления электрического поля, которое формируется внутри структуры. В полупроводниковой подложке, выполненной из материала арсенид галлия, носители заряда имеют более высокую подвижность, чем в карбиде кремния, что приводит к повышению выходного тока стока, увеличению быстродействия и верхней рабочей частоты транзистора. Предложенная конструкция транзистора позволяет увеличить выходной ток стока за счет увеличения подвижности носителей заряда в подложке из арсенида галлия и полного размещения контактных областей стока и истока на слое графена.

Для подтверждения реализации полезной модели выполнено моделирование с использованием метода Монте-Карло выходного тока стока I_s от напряжения на затворе U_g для двух структур, у которых геометрические размеры и параметры электрических режимов были полностью идентичны, но в одной из конструкций в качестве материала подложки использовался материал карбид кремния, а в другой конструкции материал арсенид галлия. Величина постоянного напряжения, которое подавалось на сток относительно истока, в обеих конструкциях принималась равной 1,5 В, а напряжение на затворе равным $-0,15$ В. Полученные в результате моделирования зависимости выходного тока стока I_s от напряжения на затворе U_g представлены кривыми 7 и 8 на фиг. 2 при использовании материала карбида кремния в качестве подложки. При этом данные, представленные кривой 7 на фиг. 2, соответствуют конструкции транзистора, показанной на фиг. 1, однако в ней отсутствует слой графена, обозначенный цифрой 5 на фиг. 1. Кривая 8 на фиг. 2 полностью соответствует конструкции транзистора, представленной на фиг. 1.

Сравнительный анализ кривых 1 и 2, представленных на фиг. 2, показывает, что использование слоя графена позволяет значительно увеличить выходной ток I_s и крутизну выходной характеристики.

Еще более значительного увеличения выходного тока можно достичь при использовании в качестве материала подложки арсенида галлия. Это подтверждает анализ кривых 9 и 10, представленных на фиг. 2 и полученных при моделировании по методу Монте-Карло. Кривая 10 на фиг. 2 соответствует конструкции транзистора, в котором длина слоя графена L_t равна длине подложки и контакты стока и истока полностью расположены на слое графена. Кривая 9 на фиг. 2 соответствует варианту конструкции транзистора, в котором длина слоя графена меньше длины подложки и контакты стока и истока лишь частично расположены на слое графена, а оставшаяся часть омических контактов истока (элемент 1 на фиг. 1) и стока (элемент 4 на фиг. 1) расположена непосредственно на подложке из арсенида галлия. Сравнительный анализ кривых 9 и 10, представленных на фиг. 2, показывает, что использование слоя графена, который имеет длину, равную длине подложки и

контакты стока и истока, полностью расположены на слое графена, позволяет увеличить выходной ток I_s и крутизну выходной характеристики.

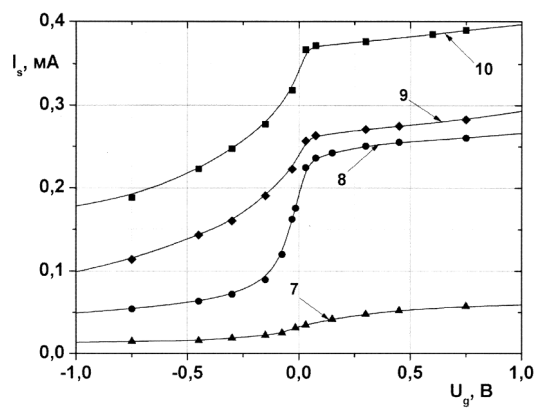
Для выявления условий достижения максимального тока для заявляемой структуры выполнялось моделирование выходного тока при разных длинах слоя графена и разной степени перекрытия площади контактов стока и истока слоем графена. Результаты моделирования представлены на фиг. 3 и 4.

На фиг. 3 представлена зависимость выходного тока стока от особенностей расположения слоя графена относительно истока транзистора. При расчете этой зависимости предполагалось размещение области стока полностью на слое графена. Анализ этой кривой показывает, что максимальная величина выходного тока транзистора достигается при полном перекрытии слоя графена области истока, т.е. при значении параметра $L_s/L_t = 0$. Параметр L_s показывает координату начала слоя графена относительно левого края подложки, координата которого принимается за нулевое значение для отсчета значения параметра L_s . При других значениях параметра L_s/L_t величина выходного тока достигает меньших значений. В диапазоне значений параметра $0 < L_s/L_t < 0,2$ слой графена имеет частичное перекрытие с омической области стока, а при значениях параметра $L_s/L_t > 0,2$ слой графена не имеет гальванического контакта с омической областью истока, и между ними формируется зазор, который по условиям моделирования заполнялся материалом арсенидом галлия.

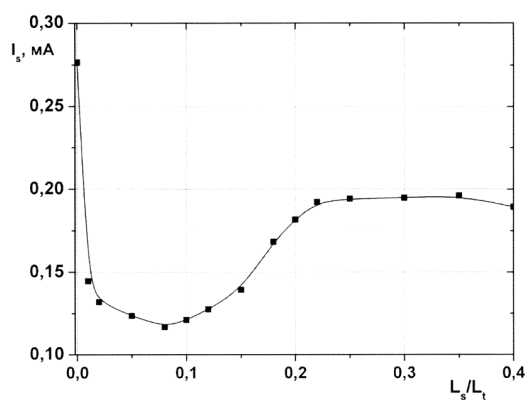
Аналогично на фиг. 4 представлена зависимость выходного тока стока от особенностей расположения слоя графена относительно стока транзистора. При расчете этой зависимости предполагалось размещение области истока полностью на слое графена. Анализ этой кривой показывает, что максимальная величина выходного тока транзистора достигается при полном перекрытии слоя графена области стока, т.е. при значении параметра $L_d/L_t = 1$. Параметр L_d показывает координату окончания слоя графена относительно левого края подложки, координата которого принимается за нулевое значение для отсчета значения параметра L_d , как и для параметра L_s .

В диапазоне значений параметра $0,8 < L_d/L_t < 1$ слой графена имеет частичное перекрытие с омической контактной областью стока, а при значениях параметра $L_d/L_t < 0,8$ слой графена не имеет гальванического контакта с областью стока и между ними формируется зазор, который по условиям моделирования заполнялся материалом арсенид галлия.

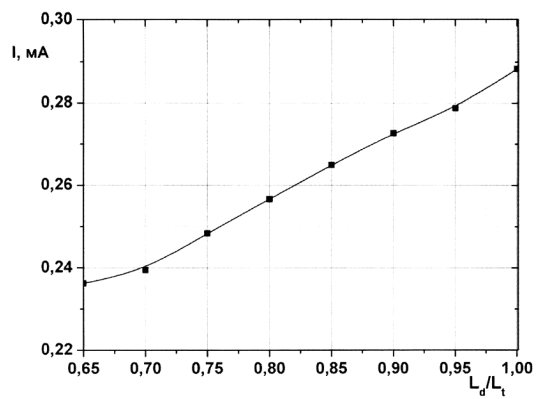
Возможность практической реализации заявляемой конструкции транзистора подтверждается результатами экспериментальных исследований свойств омических контактов, выполненных из различных металлов и их комбинаций (хром, титан, платина, золото и другие) и нанесенных на слой графена путем вакуумного напыления металлов, фотолитографического травления и ряда других технологических операций [6]. Слой графена на подложку из арсенида галлия может быть нанесен путем химического осаждения паров или химического парофазного осаждения (VCD) [7].



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4