

УДК 621.382.323: 537.533.9

**НАНОПРОФИЛИРОВАНИЕ РЕЗИСТНОЙ МАСКИ ПРИ СОЗДАНИИ
Т-ОБРАЗНОГО ЗАТВОРА СВЧ ПТШ**

Л.А.Савченко, М.Н.Петров*

NANOPROFILING THE RESIST MASK AT MICROWAVE MESFET'S T-GATE FABRICATION

L.A.Savchenko, M.N.Petrov*

ЗАО «Планета», Великий Новгород, nomad314@ya.ru

** Институт электронных и информационных систем НовГУ, michail.petrov@novsu.ru*

Рассматриваются проблемы технологии изготовления СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки. В процессе работы были подобраны оптимальные режимы электронно-лучевой литографии, позволяющие сформировать Т-образные затворы на базе трехслойной системы резистов. Полученные экспериментальные данные позволяют расширять линейку выпускаемых транзисторов на область более высоких частот.

Ключевые слова: СВЧ полевые транзисторы, полевые транзисторы с барьером Шоттки, затвор транзистора, электронно-лучевая литография

This article deals with the problems of manufacturing technology of microwave field-effect transistors with the Schottky barrier. In the process of work, optimal modes of electron-beam lithography were chosen, which allow forming T-shaped closures on the basis of a three-layer system of resistors. The obtained experimental data allow expanding the line of produced transistors to the region of higher frequencies.

Keywords: microwave field-effect transistors, field-effect transistors with the Schottky barrier, transistor gate, e-beam lithography

Введение

Полевые транзисторы с барьером Шоттки нашли широкое применение в СВЧ устройствах ввиду их более простой и совершенной технологии изготовления в сравнении с биполярными транзисторами, а также за счет протекания в них тока в однородной среде канала, а не через *p-n*-переходы [1].

Для улучшения основных параметров СВЧ транзисторов, таких как граничная частота (частота отсечки) f_T и коэффициент шума $K_{ш}$, необходимо уменьшать длину канала за счет сокращения длины затвора транзистора [2-4].

Однако при снижении длины затвора до величины порядка 300 нм возникает ряд паразитных эффектов, негативно влияющих на достижение экстремальных характеристик прибора. Основными из них являются рост сопротивления затвора и увеличение межэлектродных емкостей затвор-исток и затвор-сток. Для минимизации указанных негативных эффектов в технологии СВЧ ПТШ используют затворы специальной формы (Т-образной или «грибообразной»). Здесь нижняя, узкая часть обеспечивает необходимые граничную частоту и усиление, а верхняя, более широкая, снижает сопротивление данного топологического элемента.

Цель работы заключается в получении сложного профиля в 3-слойной резистивной маске с помощью электронно-лучевой литографии для изготовления Т-образных затворов СВЧ ПТШ с длиной затвора $L_g = 250$ нм, общей высотой затвора порядка 0,95 мкм и размером «шляпки» затвора $L_c = 1$ мкм (рис.1).

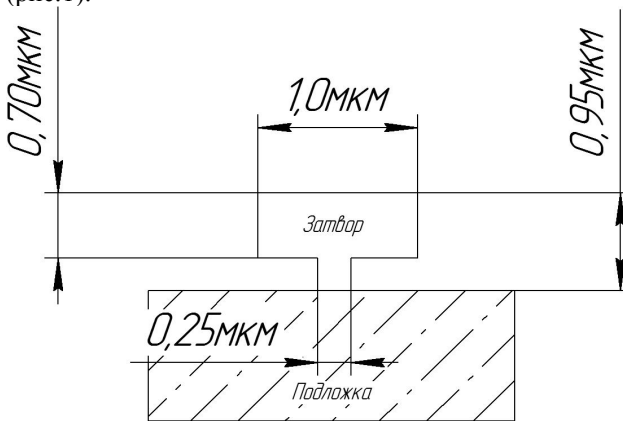


Рис.1. Схематическое изображение Т-образного затвора СВЧ ПТШ

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- подобрать оптимальную толщину слоев электронного резиста;
- подобрать оптимальные режимы экспонирования и проявления.

Основные параметры СВЧ ПТШ

В качестве параметров, характеризующих частотные свойства СВЧ транзисторов, приводят максимальную частоту генерации f_{max} и граничную частоту (частоту отсечки) f_T , касательно усилительных

свойств говорят о коэффициенте усиления по мощности K_p и коэффициенте шума $K_{ш}$ [2,3].

Все эти параметры, в явном или нет виде, зависят от такой величины, как длина затвора. Так, к примеру, существует ряд выражений, связывающий граничную частоту как с физическими свойствами материала, на котором изготавливается прибор, так и с геометрией самих затворов ПТ (выр. 1-3).

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_{зи}}, \tag{1}$$

где g_m — крутизна транзистора, $C_{зи}$ — емкость затвор-исток [2].

Частота отсечки, выраженная через время пролета носителей заряда через активную область прибора:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{пр}}. \tag{2}$$

Само же время пролета определяется непосредственно длиной канала и электрическим полем в нем:

$$\tau_{пр} = \frac{1}{2} \int_0^{\lambda_K} \frac{dx}{\mu E}, \tag{3}$$

где λ_K — длина канала [2].

Как видно из приведенных выше выражений, граничная частота f_T напрямую зависит от длины канала λ_K .

Длина канала определяется расстоянием между контактами стока и истока $L_{си}$ (рис.2). В свою очередь, это расстояние условно можно разбить на три области: расстояние от истока до затвора $L_{зи}$, длина самого затвора L_z и расстояние от затвора до стока $L_{зс}$.

Уменьшение длины канала приводит к снижению времени пролета носителей заряда. Однако одновременно с этим происходит снижение межэлектродных расстояний $L_{зи}$ и $L_{зс}$, приводящих к увеличению емкости затвор-исток и затвор-сток, что негативно сказывается на быстроте действия прибора.

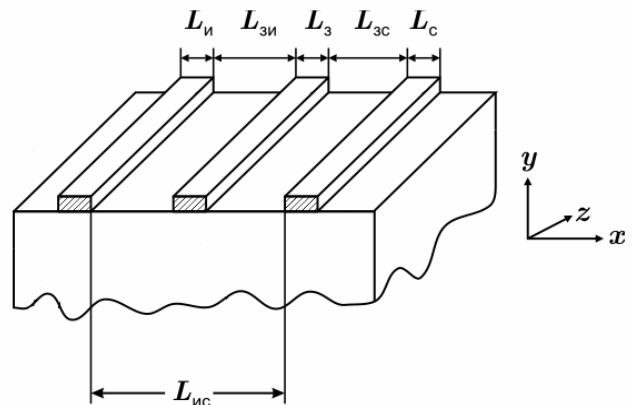


Рис.2. Схематическое изображение полевого транзистора

Таким образом, чтобы добиться лучших частотных характеристик, необходимо, уменьшая длину затвора, минимизировать влияние перечисленных паразитных емкостей.

Как уже упоминалось, это достигается использованием в конструкции СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки специальной формы (Т-образной) затвора (рис.2). Такая форма затвора является оптимальной с точки зрения вносимых паразитных эф-

фектов. В частности, по сравнению с другими формами затвора (Y-образной или V-образной) она обеспечивает минимальное значение емкости между истоком и затвором. Кроме того, такая форма позволяет снизить сопротивление затвора за счет более широкой верхней части [2,3,5].

Технология изготовлений T-образного затвора

Существует ряд способов изготовления грибовидных затворов, которые можно условно поделить на «прямые» и «косвенные». Ко вторым относится метод с использованием так называемого «sidewall spacer» или иначе «пристеночного диэлектрика» [6], к прямым же методам относят процесс «прямой» литографии — переноса изображения с шаблона на материал чувствительный к тому или иному типу излучения — резист (фото-, рентгено-, электронорезист) [7].

Методы, относящиеся к первой группе, обладают относительно низкой воспроизводимостью, поэтому они наименее предпочтительны с экономической точки зрения.

Для изготовления затворов с помощью «прямого» типа литографии наиболее подходит электронно-лучевая литография. Она обладает достаточно высоким разрешением и не требует шаблонов, позволяя «рисовать» изображение на резисте напрямую [7]. Самое главное — установки такого типа позволяют «профилировать» дозу экспонирования, что является главным условием изготовления T-образных затворов, без применения различного рода ухищрений в виде двойного экспонирования или применения промежуточных слоев [5,8].

При отработке технологии изготовления затвора T-образной формы использована кремниевая пластина с нанесенной на ней трехслойной системой электронорезистов на основе полиметилметакрилата и полиметилглутаримида: ПММА950/ПМГИ/ПММА950 (рис.3).

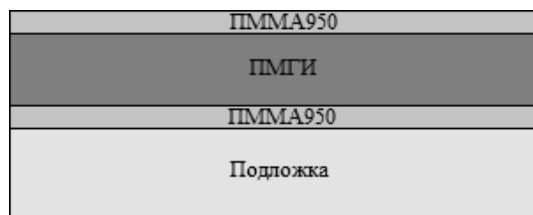


Рис.3. Схематическое расположение слоев в 3-слойной системе резистов

Здесь нижний слой отвечает за формирование ножки затвора, а именно за ее длину (т.е. длину самого затвора) и высоту. Часто этот слой является наименее чувствительным в системе резистов.

Средний слой системы является самым чувствительным из трех, он отвечает за качество взрыва после процесса напыления системы металлов, также он ответственен за формирование «шляпки» затвора в процессе напыления системы металлов.

Верхний слой резистивной маски выполняет двойную роль: он задает размер шляпки затвора (ширину) и предотвращает попадание металла при напылении на стенки второго слоя, т.е. также отвечает за качество взрыва.

Подобное сочетание резистивных покрытий позволяет получить сложный профиль в маске за одно экспонирование при этом без использования так называемых «стоп-слоев» (тонкой пленки металла толщиной в несколько нм), что обеспечивает селективность при проявлении.

Общая толщина нанесенной системы составляет порядка 1,5 мкм. Толщина нижнего слоя ПММА — 250 нм, слоя ПМГИ — 1000 нм, толщина верхнего слоя ПММА составляет 250 нм.

Экспериментальная часть

Методика проведения эксперимента содержит в себе основные стадии любого литографического процесса: нанесение, сушка, экспонирование, проявление.

Первым этапом является нанесение электронорезиста. Для этого существует ряд способов, таких как окунание, полив, распыление и центрифугирование (если речь идет о больших толщинах резистивного слоя, то здесь имеет место быть метод накатки).

Далее после нанесения электроночувствительный материал подсушивается с помощью СВЧ- или ИК-сушки или на «плитке». Затем следует избирательное экспонирование нанесенного резиста или системы резистов электронами.

Для выполнения экспериментов использовался вариант формы затвора, приведенный на рис.1. Подобная форма затвора является оптимальной для T-образной конструкции с длиной затвора 250 нм. Здесь высота «ножки» затвора равна его длине (в данном случае 250 нм). Уменьшение высоты «ножки» приводит к росту емкости затвора, что снижает граничную частоту, согласно результатам исследований, отображенным на рис.4 [5]. В противном случае чрезмерно высокая ножка будет неустойчива при удалении резиста после напыления системы металлов.

Таким образом, предложенная конфигурация является компромиссным решением между возможными вариантами, это должно обеспечить хороший «взрыв» резиста с металлом без «отрыва» затворов с поверхности пластины.

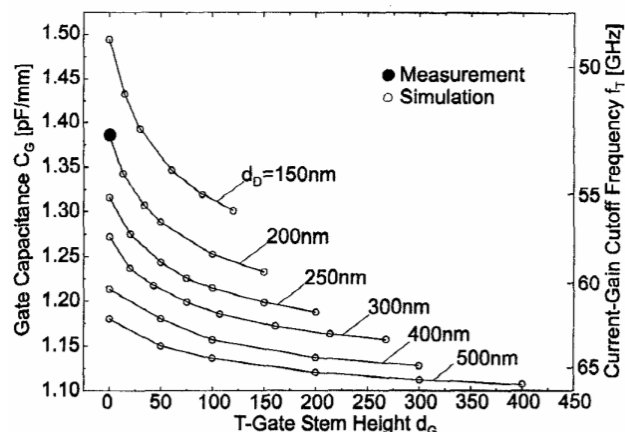


Рис. 4. Зависимость емкости затвора C_g и граничной частоты f_T от высоты «ножки» затвора d_g (здесь d_D — высота от поверхности полупроводника до наиболее широкой части затвора — «шляпки»), для длины затвора $L_g = 220$ нм и общей высоты затвора 800 нм при напряжении сток-исток 2 В и затвор-исток 0,4 В

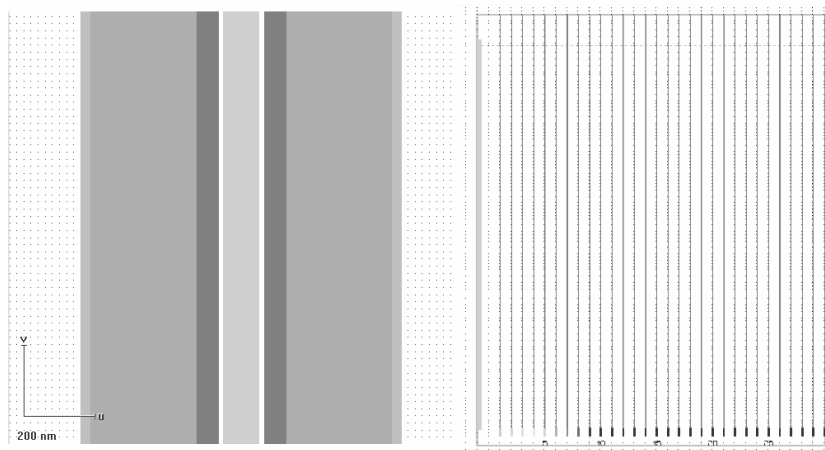
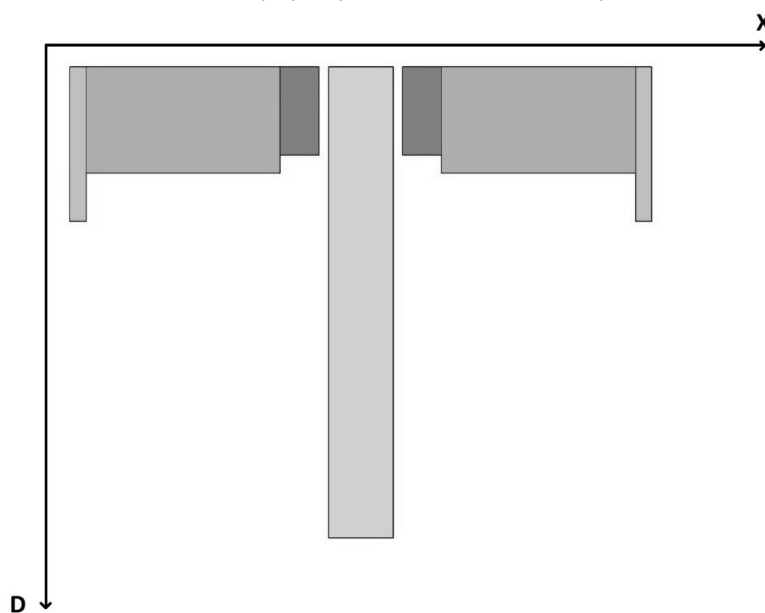


Рис.5. Дизайн с профилированной дозой для затвора СВЧ ПТШ

Рис.6. Схематическое изображение распределения дозы экспонирования D по координате

Результаты работы

В ходе эксперимента экспонирование было проведено по дизайну, показанному на рис.5. Предложенная конфигурация в сечении имеет распределение экспозиции по координате, соответствующее рис.6.

Из последнего рисунка видно, что распределение дозы представляет собой грибообразный профиль. Здесь дозы были подобраны таким образом, чтобы крайние элементы в распределении (элементы справа и слева от центральной части с большей дозой) не воздействовали на нижний слой системы резистов, который отвечает за формирование «ножки» затвора. Элемент, расположенный посередине изображения, разрушает (в нашем случае) молекулярную структуру всех слоев системы. Ввиду более высокой экспозиции по сравнению с остальными элементами данная конфигурация имеет «разрывы» по координате, это необходимо для компенсации взаимного эффекта близости и получения резкого профиля в нижнем слое маски.

Контроль формы проявленного профиля производится путем скалывания пластины в перпендикулярном заложенному изображению направлении (рис.7).

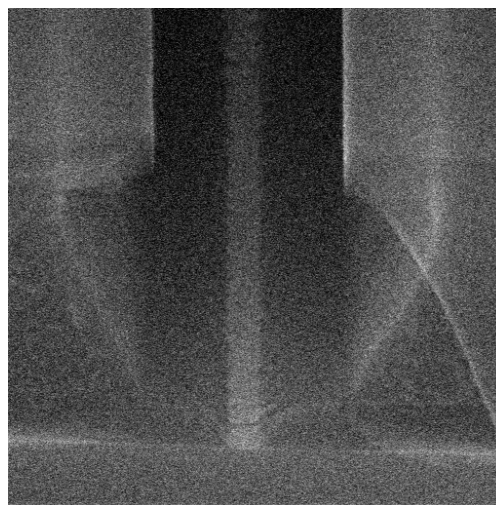


Рис.7. Проявленный профиль в системе электроно-резистов

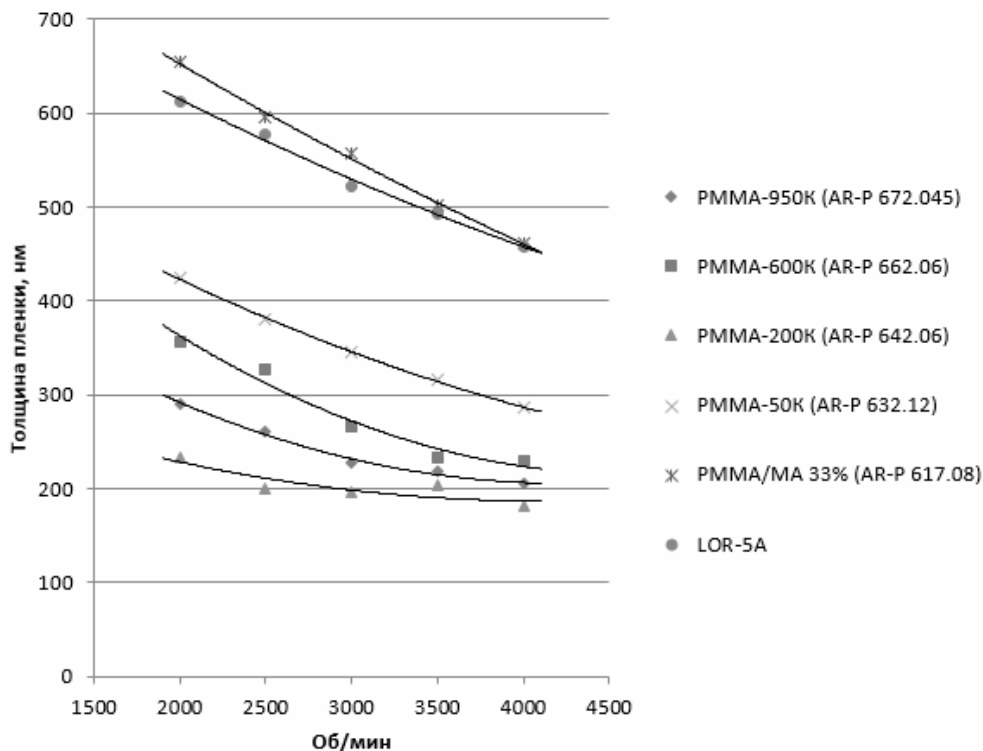


Рис.8. Зависимости толщин резистных пленок от частоты вращения центрифуги

Резисты наносились на центрифуге Sawatec SM-180-BM. ПММА был нанесен при 3000 Об/мин, что обеспечило толщину слоя ~ 250 нм с разбросом по пластине ± 7 нм. Слой ПМГИ наносился также при 3000 Об/мин, при этом толщина слоя составила ~ 1000 нм с разбросом ± 12 нм. С учетом разброса толщина полученной пленки соответствует заданным требованиям. На рис.8 приведены зависимости толщин резистных пленок от частоты вращения центрифуги.

Сушка резиста производилась на плитке Sawatec HP-200-Z-HMDS. Каждый слой сушился в течении трех минут, температура снижалась от нижнего слоя к верхним с 200°C до 180°C , сушка производилась послойно.

Экспонирование системы резистов было произведено на установке Raith Voyager по дизайну, изображенному на рис.6, номинальная доза экспонирования составила 350 мкКл/см², ток электронного луча — 450 пА, доза «шляпки» затвора от краев к центральной линии — $239/164,5/136,5$ мкКл/см². Доза центральной линии (она же «ножка» затвора) изменялась от 350 до 1440 мкКл/см² с приращением 5% от предыдущей линии. С помощью такого изменения дозы было получено некое подобие классического «дозового клина», который позволяет определять необходимую дозу экспонирования.

Проявление скрытого изображения в системе резистов производилось в наборе проявителей МИБК:ИПС в соотношениях $1:3$ и $1:2$ для слоев на основе ПММА. ПМГИ резист был проявлен в водном растворе гидроксида калия.

Как было выше сказано, проявителем для резистов на основе ПММА является раствор МИБК:ИПС.

Для верхнего слоя было выбрано соотношение $1:2$, это необходимо для обеспечения «чистоты» проявляемой щели в этом слое системы, и время проявления составило $4,5$ минуты.

Средний слой системы проявлялся в 1% растворе КОН (ПМГИ легко проявляется в щелочах, что обеспечивает селективность проявления) за 2 минуты. Стоит отметить, что ПМГИ (в нашем случае) мало чувствителен к воздействию электронов, из чего следует, что размер проявляемого элемента в этом слое сильно зависит от времени проявления и концентрации раствора. И по этой же причине необходимо было обеспечить качественное проявление верхнего слоя системы.

Нижний слой системы проявлялся в растворе МИБК:ИПС в соотношении $1:3$ за $1,5$ минуты.

После проявления и скальвания образца были получены изображения профилей в резистной маске (рис.7), по данным замеров ширины щелей в нижнем слое резиста построена зависимость длины затвора от дозы экспонирования (рис.9).

Контроль проводился также на установке ЭЛЛ Raith Voyager с помощью держателя образцов под углом 70° относительно поверхности предметного стола. При этом настоящие размеры (по вертикали изображения) отличаются от измеренных менее чем на 6% .

В соответствии с экспериментальными данными, приведенными на рис.9, для получения затвора длиной 250 нм необходима доза экспонирования порядка 550 мкКл/см².

Отметим, что в работе [6] был получен затвор длиной порядка 180 нм с помощью оптической фотолитографии, однако процесс создания был усложнен

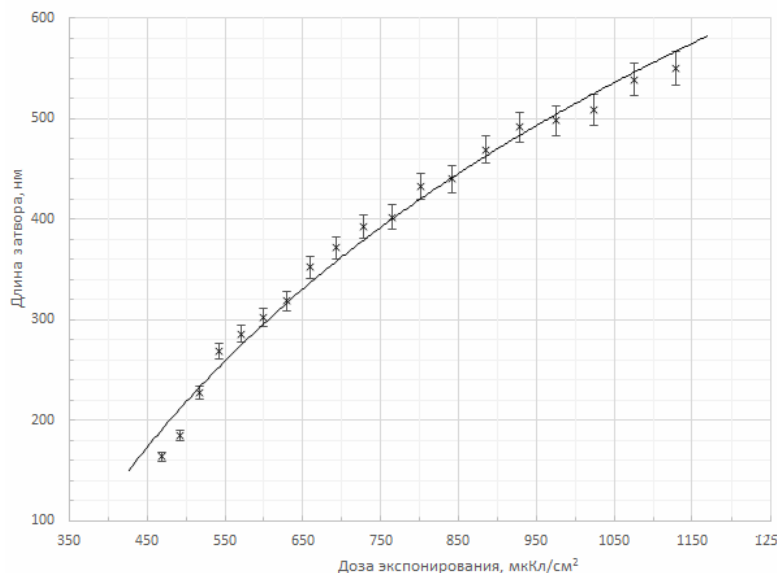


Рис.9. Зависимость длины затвора от дозы экспонирования

путем введения дополнительных операций осаждения и травления. Такой способ изготовления несколько увеличивает время производства и характеризуется в сравнении с ЭЛЛ более низкой воспроизводимостью.

Заключение

При выполнении данной работы были разработаны технологические режимы процесса электронно-лучевой литографии для изготовления Т-образного затвора СВЧ ПТШ (рис. 1):

— для получения необходимого профиля была выбрана система резистов: ПММА950/ПМГИ/ПММА950;

— подобраны оптимальные для поставленной цели режимы нанесения и сушки слоев резиста;

— подобраны дозы экспонирования и времена проявления скрытого изображения.

Полученные в работе результаты можно использовать для расширения линейки выпускаемых СВЧ ПТШ на более высокочастотный диапазон.

1. Нойкин Ю.М., Нойкина Т.К., Усаев А.А. Полупроводниковые приборы СВЧ: учеб. пособие [Эл. ресурс] // Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 2014. URL: <http://www.phys.sfedu.ru/~kobrin/sem/index.html#SHFdevch9.html> (дата обращения: 19.04.2017).
2. Пожела Ю., Юцене В. Физика сверхбыстродействующих транзисторов. Вильнюс: Мокслас, 1985. 118 с.
3. Ди Лоренцо Д.В., Канделуола Д.Д. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принцип работы и технология изготовления. М.: Радио и связь, 1988. 496 с.
4. Готра. З.Ю. Технология микрорезистивных устройств. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
5. Brech H., Grave T., Simlinger T., Selbrherr S. Influence of T-Gate and footprint length of PHEMT high frequency performance. Siemens AG, Corporate Technology, ZT KM 5, B-81730 Munich, Germany, 1997 IEEE.
6. Степаненко М.В., Арыков В.С., Ющенко А.М. и др. Полевой транзистор с субмикронным Т-образным затвором,

полученным с использованием пристеночного диэлектрика // Доклады ТУСУРа. 2014. №1 (31). С.103-105.

7. Лапшинов Б.А. Технология литографических процессов. Учебное пособие. М.: МГИЭМ, 2011. 95 с.
8. Indykiewicz K., Paszkiewicz B., Szymanski T., Paszkiewicz R. Electron beam lithography double step exposure technique for fabrication on mushroom-like profile in bilayer resist system // J. of Electrical Engineering. 2014. V.65. №6. P.381-385.

References

1. Noikin Yu.M., Noikina T.K., Usaev A.A. Poluprovodnikovye pribory SVCh [Semiconductor microwave devices]. Rostov-on-Don, SFEDU, 2014. Available at: <http://www.phys.sfedu.ru/~kobrin/sem/index.html#SHFdevch9.html> (accessed 10.03.2016).
2. Pozhela Ju., Iutsene V. Fizika sverkhbystrodeystvuyushchikh tranzistorov [Physics of ultra-high-speed transistors]. Vilnius, "Mokslas" Publ., 1985. 118 p.
3. DiLorenzo J.V., Khandelwal D.D. GaAs FET Principles and Technology. Dedham, MA, Artech House, Inc., 1982. 787 p. (Russ. ed.: Di Lorentso D.V., Kandeluola D.D. Polevyje tranzistora na arsenide galliia. Printsip raboty i tekhnologiya izgotovleniia. Moscow, "Radio i sviaz" Publ., 1988. 496 p.)
4. Gotra. Z.Iu. Tekhnologiya mikroelektronnykh ustroystv [Microelectronic device technology]. Moscow, "Radio i sviaz" Publ., 1991. 528 p.
5. Brech H., Grave T., Simlinger T., Selbrherr S. Influence of T-gate shape and footprint length on PHEMT high frequency performance. Siemens AG, Corporate Technology, ZT KM 5, B-81730 Munich, Germany, 1997 IEEE.
6. Stepanenko M.V., Arykov V.S., Iushchenko A.M., Plotnikova A.Iu. Ishutkin S.V. Polevoi tranzistor s submikronnym T-obraznym zatvorom, poluchennym s ispol'zovaniem pristenochnogo dielektrika [Field effect transistor with submicron T-shaped Schottky gate fabricated by using sidewall dielectric]. Doklady TUSUR – Proceedings of TUSUR, 2014, no. 1(31), pp. 103-105.
7. Lapshinov B.A. Tekhnologiya litograficheskikh protsessov [Technology of lithographic processes]. Moscow, MGIEM Publ., 2011. 95 p.
8. Indykiewicz K., Paszkiewicz B., Szymanski T., Paszkiewicz R. Electron beam lithography double step exposure technique for fabrication on mushroom-like profile in bilayer resist system. Journal of Electrical Engineering, 2014, vol.65, no.6, pp.381-385.