

УДК 621.382.032.27

DOI: 10.17223/00213411/64/2/63

*И.В. КУЛИНИЧ, А.И. КАЗИМИРОВ, Е.В. ШЕСТЕРИКОВ*

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ Т-ОБРАЗНЫХ ЗАТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОГО УГЛОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ\*

Представлена технология изготовления Т-образных затворов GaAs-транзисторов с использованием оптической литографии и уникального метода направленного углового напыления тонких алюминиевых пленок. Минимальная длина ножки Т-образного затвора, сформированного по разработанной технологии, составила  $L_g = 25$  нм. GaAs-транзистор с Т-образным затвором, сформированным с использованием углового направленного напыления, продемонстрировал ток насыщения сток-исток  $I_{\text{СИН}} = 140$  мА/мм, напряжение пробоя затвор-сток, по уровню тока  $I_{\text{ЗС}} = 50$  мкА, составило  $U_{\text{ЗС проб}} = 9$  В, напряжение отсечки  $U_{\text{отс}} = 2$  В.

**Ключевые слова:** наноразмер, GaAs-транзистор, Т-образные затворы, угловое напыление, тонкие пленки.

### Введение

Транзистор с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – НЕМТ) является основным элементом современных микроволновых монолитных интегральных схем (МИС). Наряду с гетероэпитаксиальными слоями, омические и барьерные контакты служат основными элементами транзистора, определяющими совокупность его электрических параметров. Основной характеристикой контактов является их электрическое сопротивление, которое в случае барьерного контакта, т.е. затвора, определяется его длиной. Субмикронные Т-образные затворы в промышленном производстве GaAs МИС традиционно изготавливаются с использованием методов электронно-лучевой литографии в системах с переменным профилем электронного пучка или гауссова пучка. Разрешение этих методов в основном обусловлено высокой энергией электронного пучка: около 50–100 кэВ для получения затворов длиной менее 50 нм. Сложность достижения таких энергий при формировании пучков минимального сечения (порядка 2 нм) приводит к рекордному увеличению стоимости литографического оборудования. Кроме того, эффект рассеяния электронов ограничивает минимальный размер топологических элементов, формируемых в резисте. По этим причинам все большую актуальность приобретает разработка различных косвенных методов, позволяющих формировать Т-образные затворы без использования электронно-лучевой литографии.

Наиболее простым из известных косвенных методов получения субмикронного затвора является метод с использованием углового напыления тонких пленок металлизации затвора. К преимуществам данного метода можно отнести возможность создания затворов субмикронного размера с использованием резистивных масок, полученных методами оптической литографии низкого разрешения. Данный метод характеризуется как высокой разрешающей способностью, так и низкой себестоимостью производства. Однако из-за отсутствия возможности формирования наноразмерных затворов Т-образной формы данный метод не нашёл промышленного применения.

Основная цель настоящей работы – разработка технологии формирования наноразмерных Т-образных затворов при использовании традиционных методов оптической литографии и направленного углового напыления тонких пленок алюминия.

### 1. Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов по формированию макета субмикронного Т-образного затвора с помощью методов оптической литографии и направленного углового напыления тонких пленок, использовались подложки полуизолирующего арсенида галлия (*i*-GaAs) с ориентацией граней кристаллических решеток (100).

Расчет необходимого угла ориентации пластины относительно нормали к поверхности производился с помощью моделирования в программе Silvaco T-CAD. Для учета процесса затенения маской при угловом напылении использовалась модель однонаправленного напыления [1]. Для

\* Выполнение данной работы финансировалось РФФИ и Томской областью в соответствии с исследовательским проектом № 19-42-703023.

напыления вторичной маски был изготовлен универсальный держатель пластин диаметром до 100 мм, способный изменять угловое положение пластины относительно потока испаряющегося материала.

Перед нанесением резистивной маски пластина подвергалась химической очистке в органическом растворителе метилпирролидона в течение  $t = 5$  мин, промывке в изопропиловом спирте  $t = 1$  мин, с последующей сушкой в потоке азота. После чего для удаления остатков растворителя пластина подвергалась термической обработке при температуре  $T = 200$  °С в течение  $t = 5$  мин.

Далее на пластину методом центрифугирования последовательно наносились слои фоторезистов LOR-5B и AZ351B со скоростями  $v = 400\text{--}1700$  об/мин и ускорениями  $\xi = 400\text{--}800$  об/мин<sup>2</sup>. Каждый слой резиста сушился на горячей плите при температурах  $T = 190$  и  $100$  °С соответственно. Экспонирование проводилось на установке лазерной литографии Heidelberg DWL 2000 излучением с мощностью  $P = 24$  мВт, длиной волны  $\lambda = 405$  нм и диаметром луча  $d = 200$  нм. Проявление осуществлялось в MF319 в течение  $t = 20$  с при последующей промывке в деионизованной воде в течение  $t = 1$  мин и сушке в потоке очищенного азота. Размер окна в резисте составил  $L_1 = 800\text{--}820$  нм (рис. 1).

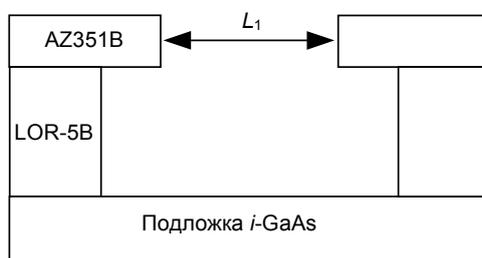


Рис. 1. Первичная фоторезистивная маска LOR-5B и AZ351B на подложке *i*-GaAs

Перед напылением пластина с уже сформированной маской подвергалась очистке от собственных оксидов и поверхностных загрязнений в водном растворе  $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O} (1 : 10)$  в течение времени  $t = 1$  мин с последующей промывкой в деионизованной воде в течение  $t = 2$  мин и сушкой в потоке очищенного азота.

Универсальный держатель закреплялся на карусели установки электронно-лучевого напыления, угол фиксировался в диапазоне  $\alpha = 20\text{--}21^\circ$  путем изменения расстояния  $h$  между краем верхней части держателя 1 и краем нижней части 2, в которую устанавливалась пластина (рис. 2). Таким образом, угол влета атомов металла в окна первичной резистивной маски во время напыления также был равен  $\alpha$ .

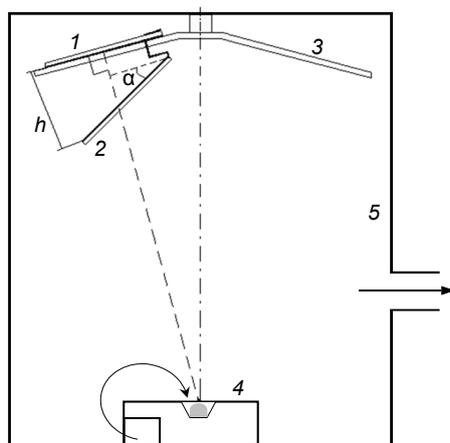


Рис. 2. Схема вакуумной камеры с универсальным держателем: 1 – верхняя часть держателя; 2 – нижняя часть держателя с пластиной; 3 – карусель; 4 – электронно-лучевая пушка с испаряемым материалом; 5 – стенки вакуумной камеры

Затем вакуумная камера установки напыления откачивалась до остаточного давления  $p = (1.2\text{--}3.0) \cdot 10^{-6}$  мбар и проводилось первое напыление тонкой алюминиевой пленки, выполняющей роль вторичной металлической маски (подслоя), толщиной  $d = 80\text{--}100$  нм.

Алюминий был выбран в качестве материала подслоя, так как он имеет низкий коэффициент диффузии. Кроме того, травитель алюминия характеризуется низкой скоростью травления арсенида галлия.

Измерение расстояния  $h$  проводилось электронным штангенциркулем, с абсолютной погрешностью  $\Delta h = 0.01$  мм. Зависимость угла  $\alpha$  от расстояния  $h$  имеет линейный характер и описывается формулой:

$$\alpha = k \cdot h + b, \quad (1)$$

где  $k, b$  – коэффициенты, подобранные экспериментальным путем.

Погрешность угла  $\alpha$  будет соответствовать погрешности измеренного расстояния  $h$ . Соответственно точность выставления угла составляет 1%.

После первого напыления подслоя Al вакуумная камера развакуумировалась, пластина поворачивалась на  $180^\circ$  в плоскости держателя, угол наклона держателя устанавливался в диапазоне  $\beta = 18-19^\circ$ . Затем камера откачивалась и осуществлялось второе напыление подслоя Al толщиной  $d = 80-100$  нм. В результате на пластине была сформирована вторичная металлическая маска. Щель с размером  $L_2 = 25-150$  нм определяла длину ножки затвора. Размер шляпы определялся размером  $L_1$  первичной фоторезистивной маски.

После этого пластина устанавливалась непосредственно в карусель установки напыления и после откачки осуществлялось напыление T-образного затвора, состоящего из пленок Ti, Mo, Cu с толщинами 80–300 нм. После напыления затворной металлизации проводилось травление подслоя Al с использованием травителя на основе оксида хрома, плавиковой кислоты и деионизованной воды. Удаление резистивной маски осуществлялось в метилпирролидоне с последующей промывкой в изопропиловом спирте при температуре  $T = 60^\circ\text{C}$  и сушкой в потоке очищенного азота.

#### Моделирование технологических процессов формирования T-образного затвора при использовании углового напыления тонких пленок

Для определения необходимого угла держателя полупроводниковой пластины была рассчитана формула, связывающая толщину двуслойной фоторезистивной маски и размер окна в верхнем слое резиста с требуемой длиной ножки T-образного затвора:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L_1 + L_g}{2 \cdot h_m}\right), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол держателя полупроводниковой пластины, град;  $L_1$  – размер окна в верхнем слое фоторезистивной маски, нм;  $h_m$  – общая толщина фоторезистивной маски, нм;  $L_g$  – длина ножки T-образного затвора, нм.

На рис. 3 представлено графическое пояснение формулы (2).

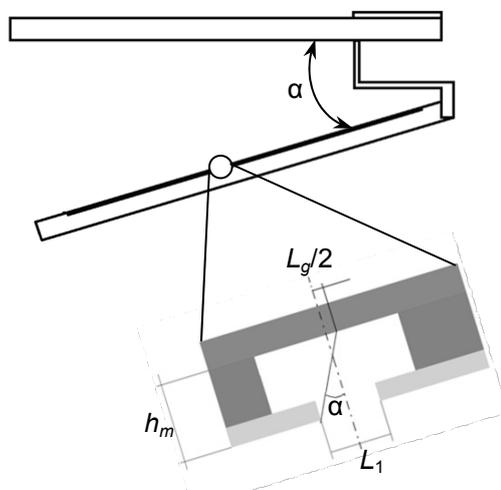


Рис. 3. Графическое пояснение формулы (2)

На рис. 4 показана зависимость длины T-образного затвора от угла влета атомов металла при толщине резистивного слоя  $h_m = 1.1$  мкм и окне в верхнем слое резиста  $L_1 = 820$  нм.

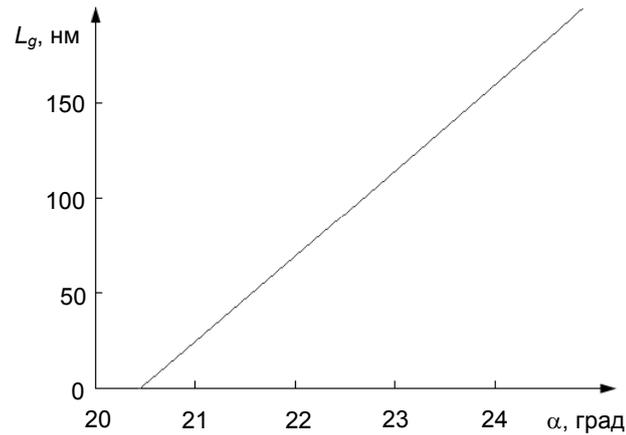


Рис. 4. Смоделированная зависимость длины ножки затвора от угла влета атомов металла

Из рис. 4 видно, что график зависимости  $L_g = f(\alpha)$  на участке  $L_g = 0\text{--}200$  нм имеет линейный характер и при фиксированном размере окна в резисте зависит только от угла влета атомов. На основании полученных результатов можно утверждать, что изменяя угол влета атомов металла в резистивную маску, можно получать затвор длиной вплоть до физического предела.

На рис. 5 представлена модель затвора с длиной ножки  $L_g = 10$  нм. Толщина первого слоя затворной металлизации  $d_1 = 90$  нм, второго слоя металлизации  $d_2 = 300$  нм. Размер окна в маске резиста  $L_1 = 820$  нм.

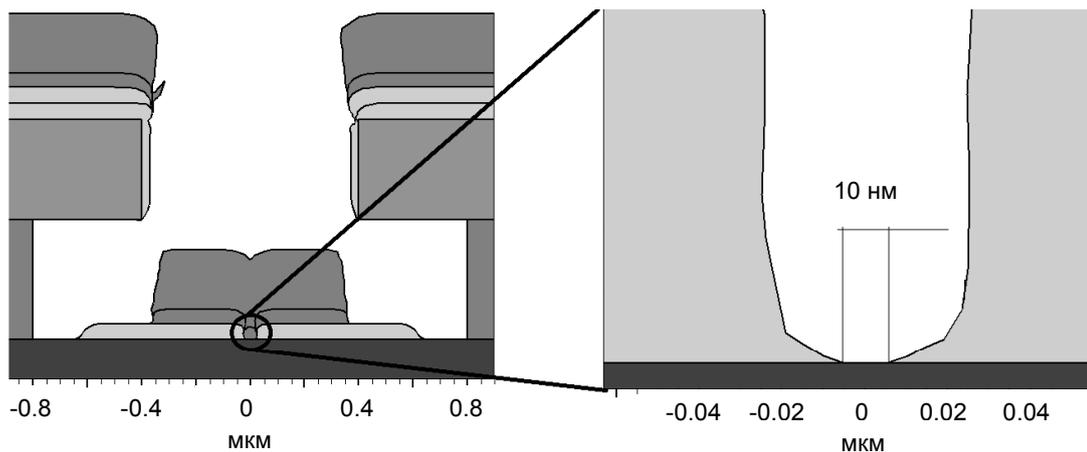


Рис. 5. Модель T-образного затвора с длиной ножки  $L_g = 10$  нм

Рассчитаем зависимость между углами  $\alpha$  и  $\beta$ , определяющую симметричное расположение ножки затвора относительно его шляпы. Для расчета примем:  $L_1 = 820$  нм,  $L_g = 100$  нм,  $h_m = 1.1$  мкм, толщина подслоя  $d = 80$  нм. Подставив значения в формулу (2), получим

$$\alpha = \arctan\left(\frac{820 \cdot 10^{-9} + 100 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 1.1 \cdot 10^{-6}}\right) = 22.7^\circ.$$

По результатам моделирования при напылении подслоя толщиной  $d = 80$  нм на боковые стенки осаждается материал толщиной порядка 50 нм. Тогда

$$\beta = \arctan\left(\frac{820 \cdot 10^{-9} - 50 \cdot 10^{-9} + 100 \cdot 10^{-9}}{2(1.1 \cdot 10^{-6} + 80 \cdot 10^{-9})}\right) = 20.2^\circ.$$

Соответственно для получения симметричного затвора относительно окна в маске резиста разность между углами должна составлять

$$\Delta = \alpha - \beta = 2.5^\circ.$$

Полученное выражение было подтверждено при моделировании.

## 2. Результаты

Проведена серия экспериментов для определения минимальной длины ножки, которая может быть сформирована с использованием метода направленного углового напыления пленок алюминия. В результате на полупроводниковой пластине был сформирован T-образный затвор с минимальной длиной ножки  $L_g = 25$  нм (рис. 6).

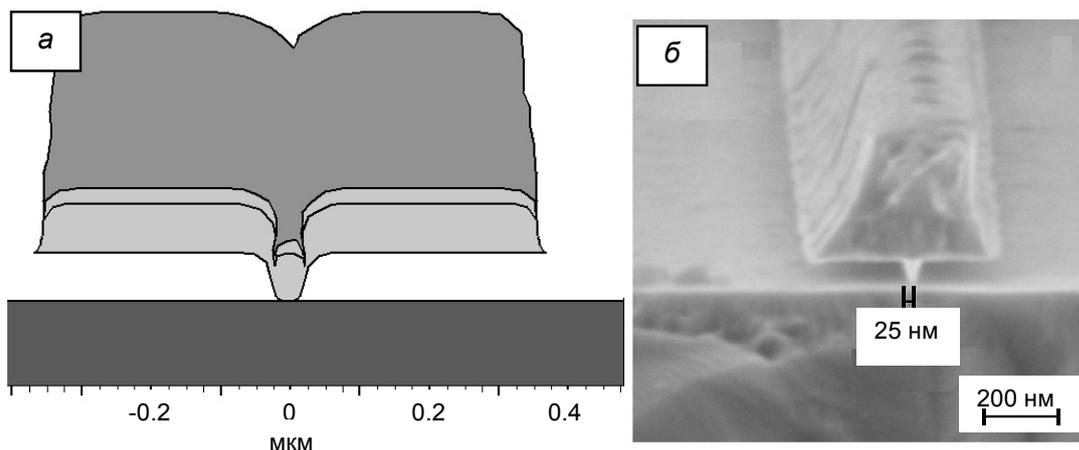


Рис. 6. Микрофотография затвора с длиной ножки  $L_g = 25$  нм: *a* – модель затвора; *б* – результат эксперимента

По полученным данным была построена экспериментальная зависимость длины ножки затвора от угла влета атомов (рис. 7). Из рис. 7 видно, что экспериментальная и смоделированная зависимости имеют одинаковый угол наклона. Несовпадение по абсолютным значениям может быть обусловлено миграцией атомов по подложке.

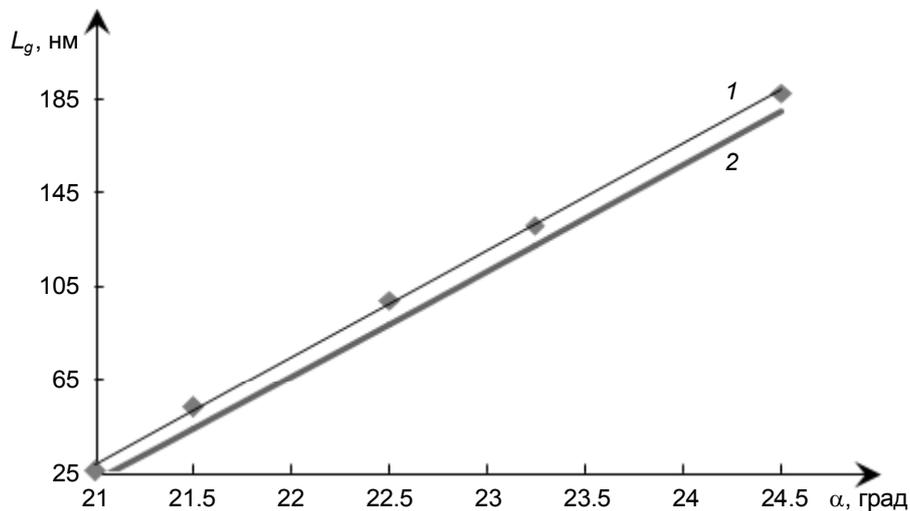


Рис. 7. Зависимость длины ножки затвора от угла влета атомов металла: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – смоделированная зависимость

### Исследование электрических параметров по постоянному току GaAs-HEMT с T-образным затвором, сформированным направленным угловым напылением тонких пленок

На рис. 8 представлена фотография исследованного GaAs-транзистора. Металлизация омических контактов состояла из пленок Pd/Ge/Al с толщинами 15/150/150 нм соответственно, металлизация затвора – из пленок Ni/Mo/Cu с толщинами 90/20/300 нм соответственно. GaAs-транзистор с

высокой подвижностью электронов с  $T$ -образным затвором, полученным с помощью углового напыления, продемонстрировал ток насыщения сток-исток  $I_{\text{СИН}} = 140$  мА/мм, напряжение пробоя затвор-сток, по уровню тока  $I_{\text{ЗС}} = 50$  мкА, составило  $U_{\text{ЗС проб}} = 9$  В, напряжение отсечки  $U_{\text{отс}} = 2$  В. Для определения остатков подслоя алюминия под затвором проводилось измерение высоты барьера Шоттки. Значение высоты барьера Шоттки составило  $\phi_b = 0.75$  эВ, что соответствует высоте барьера Ti-GaAs [2].

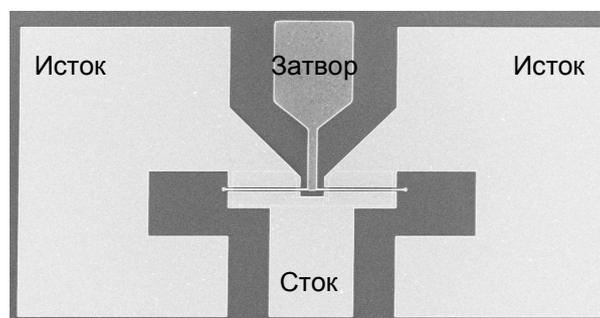


Рис. 8. Микрофотография исследованного транзистора

Таким образом, изготовленный и исследованный транзистор демонстрирует параметры по постоянному току, сравнимые с аналогичными транзисторами с затвором, изготовленным методом электронно-лучевой литографии.

### Заключение

Результаты, полученные в процессе выполнения данной работы:

1. При использовании моделирования технологических процессов в среде T-CAD Silvaco исследовано и установлено, что с помощью метода направленного углового напыления тонких пленок можно получать  $T$ -образные затворы с длинами ножек вплоть до физического предела.

2.  $T$ -образный затвор с длиной ножки  $L_g = 25$  нм был сформирован с использованием метода углового направленного напыления через двухслойную маску с размером окна в верхнем слое резиста  $L_1 = 820$  нм.

3. Изготовленный GaAs НЕМТ с  $T$ -образным затвором, сформированным с использованием углового направленного напыления, продемонстрировал ток насыщения сток-исток  $I_{\text{СИН}} = 140$  мА/мм; напряжение пробоя затвор-сток, по уровню тока  $I_{\text{ЗС}} = 50$  мкА, составило  $U_{\text{ЗС проб}} = 9$  В, напряжение отсечки  $U_{\text{отс}} = 2$  В.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [http://www.esiee.fr/~polleuxj/Documents/athena\\_users.pdf](http://www.esiee.fr/~polleuxj/Documents/athena_users.pdf).
2. Chang H.C., Lee C.S., Chen S.H., et al. // J. Electron. Mater. – 2003. – V. 33. – No. 7. – P. 15–17.

Поступила в редакцию 27.02.2020,  
после доработки – 27.07.2020.

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

**Кулинич** Иван Владимирович, к.т.н., науч. сотр. Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» (НОЦ НТ) ТУСУРа, e-mail: kulinich@tusur.ru;

**Казимиров** Артём Игоревич, науч. сотр. НОЦ НТ ТУСУРа, e-mail: smart300389@mail.ru;

**Шестериков** Евгений Викторович, к.т.н., директор НОЦ НТ ТУСУРа, e-mail: shesterikov@tusur.ru.