

Исследование СВЧ-транзистора с субмикронным Т-образным затвором, изготовленным методом наноимпринт литографии

В.И. Егоркин, А.А. Зайцев, С.С. Шмелев

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Fabrication of HEMTs with T-Gates by Nanoimprint Lithography

V.I. Egorkin, A.A. Zaitsev, S.S. Shmelev

National Research University of Electronic Technology

Приведены результаты разработки метода создания СВЧ-транзистора, в котором Т-образный затвор формируется с применением технологии наноимпринт литографии. Исследованы характеристики созданных GaAs p-HEMT-транзисторов. Разработанный транзистор имеет длину основания затвора порядка 250 нм и максимальную крутизну более 350 мСм/мм. Предельная частота усиления по току f_i составляет 40 ГГц при $V_{си}=1,4$ В, предельная частота усиления по мощности f_{max} – 50 ГГц при $V_{си}=3$ В.

Ключевые слова: наноимпринт литография; p-HEMT-транзистор; Т-образный затвор.

The method for fabrication of HEMTs, in which T-gate is formed using the nanoimprint lithography technology, has been presented. The characteristics of the created GaAs pHEMT transistors have been investigated. The developed transistor has the gate base length of 250 nm order and maximum transconductance over 350 mS/mm, the current-gain cutoff frequency (f_i) and maximum oscillation frequency (f_{max}) of 40 and 50 GHz, respectively.

Keywords: nanoimprint; pHEMT; T-gate.

СВЧ-транзисторы на основе арсенид-галлиевых гетероструктур являются основным элементом большинства высокоскоростных радиоэлектронных устройств [1], также могут применяться в качестве детекторов терагерцового излучения [2]. В настоящее время характеристики транзисторов совершенствуются в основном за счет оптимизации технологических параметров и уменьшения размеров его элементов. Один из важнейших этапов создания СВЧ-транзисторов – формирование затвора. Конструкция такого затвора, в частности уменьшение длины основания, приводит к увеличению максимальных частот усиления транзисторов по току и мощности [1]. Для формирования затворов СВЧ-транзисторов с субмикронными размерами применяется электронно-лучевая литография. Данный метод имеет недостатки, главными из которых являются малая производительность и, соответственно, высокая стоимость. Поэтому разработка методов формирования субмикрометровых затворов с применением более производительных и доступных методов литографии весьма актуальна [3].

В работе [4] приводится метод создания транзистора, при котором на первом этапе технологического процесса Т-образный затвор и знаки совмещения формируются с применением наноимпринт литографии. Штамп, содержащий Т-образный профиль затвора и знаки совмещения, формируется методом электронно-лучевой литографии. Для формирования затвора применяется двухслойная система резистов полиметилкрилат/LOR-A. После структурирования резиста проводятся травление контактного слоя гетероструктуры и напыление металла затвора. На следующих этапах технологического процесса формируются омические контакты, меза-структуры для изоляции транзисторов и металлизация разводки.

Данный метод имеет ограниченное применение, так как формирование затвора перед созданием омических контактов является существенным недостатком. Для применения данного метода необходимо использовать гетероструктуры, позволяющие формировать омические контакты без их термической обработки, в противном случае будет происходить деградация затворного контакта. Также отсутствует возможность регулирования характеристик транзисторов («подгонки»), так как при травлении контактных слоев гетероструктуры невозможно проследить изменение тока насыщения между стоком и истоком вследствие отсутствия омических контактов.

В настоящей работе приведены результаты исследования и разработки технологии изготовления транзистора с Т-образным затвором методом наноимпринт литографии, при котором металлизация затвора напыляется после формирования омических контактов. Это позволяет использовать любые доступные на сегодняшний день типы гетероструктур, а также контролировать характеристики формируемых транзисторов. При формировании штампа используются стандартная фотолитография и жидкостное травление. Это значительно упрощает процесс создания штампа по сравнению с методами, в которых используется электронно-лучевая литография [3, 4].

Создание штампа. При использовании технологии наноимпринт литографии проводится механическая модификация резиста на основе полиметилметакрилата с помощью штампа, на поверхности которого сформирован рельеф, соответствующий требуемому изображению. Достижимое предельное разрешение составляет единицы нанометров [5]. Преимущества наноимпринт литографии состоят в высокой производительности, относительной простоте процесса и невысокой стоимости оборудования.

В стандартном процессе наноимпринт литографии используются штампы, изготовленные в основном методом электронно-лучевой литографии. Срок службы такого штампа, как правило, составляет несколько сотен операций [5]. В настоящей работе для получения штампа с нанометровыми размерами применялись стандартная контактная литография и контролируемое травление SiO_2 .

На кремниевой подложке методом плазменно-стимулированного осаждения из газовой фазы (PECVD) формируется слой SiO_2 толщиной 120 нм, после чего методом фотолитографии создается никелевая маска с размерами элементов затворов транзисторов порядка 1 мкм. На следующем этапе осуществляется жидкостное травление слоя SiO_2 в буферном травителе ($\text{NH}_4\text{F}:\text{HF}$). За счет изотропного характера травления происходит подтрав оксида кремния под никелевую маску. В результате этого происходит уменьшение размеров элементов формируемого рельефа. Время травления, необходимое для получения заданных размеров затворных элементов, может быть вычислено при известной скорости травления SiO_2 . Для получения элементов шириной X мкм требуется обеспечить боковой подтрав, равный половине разницы между шириной маскирующего металла и X . Скорость травления SiO_2 измеряется на пластинах-спутниках для каждого процесса осаждения и в среднем составляет 2,5 нм/с. Время травления SiO_2 выбирается

таким образом, чтобы обеспечить размеры затворов порядка 200–250 нм. После окончания травления оксида кремния никелевая маска селективно удаляется в растворе $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2$.

Одна из важнейших операций при подготовке штампа – нанесение антиадгезионного покрытия, которое представляет собой мономолекулярный слой трихлор-(тридекафтороктил)-силана. Методом осаждения из газовой фазы на поверхности штампа формируется слой данного покрытия, снижающий адгезию штампа к резисту, что является необходимым требованием в наноимпринт литографии [6].

На рис.1 представлена фотография поверхности штампа, полученная с помощью электронного микроскопа. Ширина элементов, соответствующих затвору транзистора, составляет порядка 220 нм. Высота структур соответствует толщине осажденного оксида кремния и равна 120 нм.

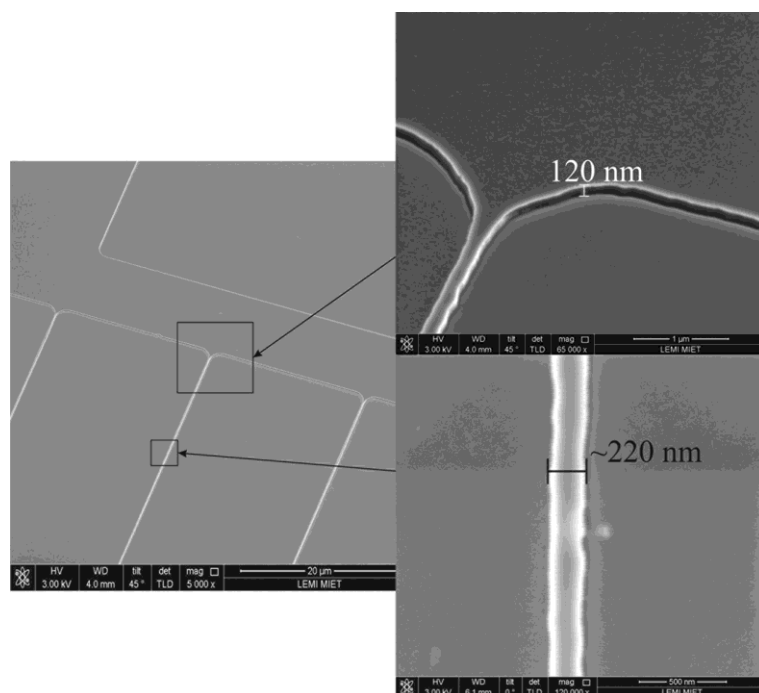


Рис.1. РЭМ-изображения поверхности штампа с рельефом затворов транзисторов

Технология изготовления транзистора с Т-образным затвором. Транзистор сформирован на основе псевдоморфных транзисторных гетероструктур $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}$ с двухсторонним легированием, выращенных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующей GaAs -подложке. Параметры основных слоев гетероструктуры следующие: донорные слои $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0,22$) с уровнем легирования $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщиной 4 нм под каналом и 10 нм над каналом; канал – нелегированный $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y = 0,17$) толщиной 12 нм; контактный слой $n\text{-GaAs}$ толщиной 50 нм и уровнем легирования $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Подвижность носителей заряда в данной гетероструктуре составляет $5000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 300 К, поверхностная концентрация электронов – от $3,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Схема разработанного процесса формирования СВЧ-транзистора с Т-образным затвором представлена на рис.2. На начальном этапе методом плазменно-стимулированного осаждения из газовой фазы на поверхности подложки формируется слой Si_3N_4 толщиной 200 нм. После этого поверхность диэлектрика центрифугированием на-

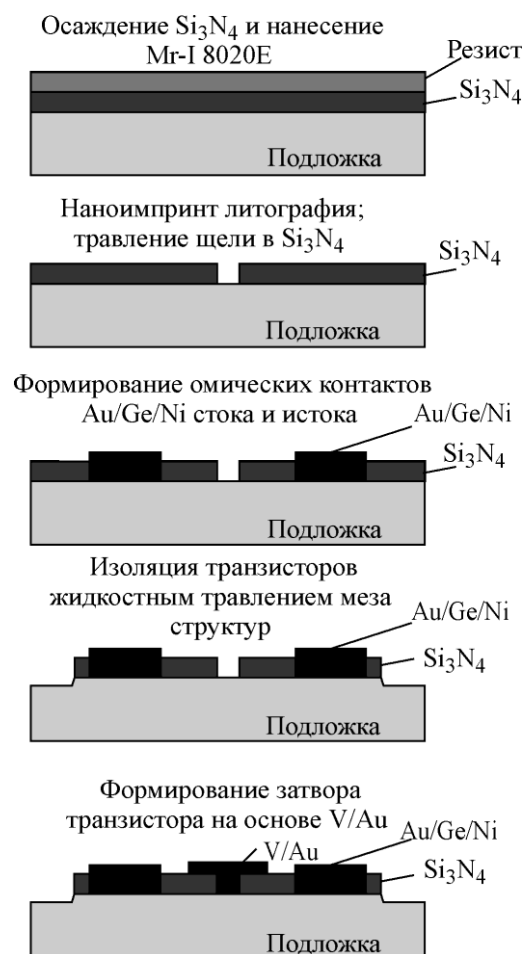


Рис.2. Схема процесса формирования транзистора с Т-образным затвором с применением наноимпринт литографии

носится слой резиста Mg-I 8020E толщиной 200 нм. Наноимпринт литографией в резисте формируется рисунок затворов транзисторов, соответствующий рельефу созданного штампа. Параметры процесса наноимпринт литографии следующие: температура штампа и подложки 180 °С; сила сдвливания 50 кгс; время процесса 580 с с учетом времени нагрева и охлаждения и выхода на рабочее давление. Для плазмохимического травления Si_3N_4 по маске резиста используется установка Corial 250 IL. Состав газовой смеси и параметры процесса травления подбираются таким образом, чтобы обеспечить высокую селективность травления нитрида кремния по отношению к резистивной маске и одновременное снижение влияния воздействия плазмохимического травления на активные слои гетероструктуры. Максимальное соотношение скоростей травления Si_3N_4 /Mg-I 8020E достигается при использовании газовой смеси CHF_3/He (1:1) и давлении в реакторе 10 мТорр [7]. Применение индуктивно-связанной плазмы позволяет снизить потенциал смещения на пластине, который составляет 40 В при мощностях ВЧ-генератора 20 Вт и индукционного генератора 100 Вт. Низкое значение потенциала смещения уменьшает эффекты воздействия плазмы на активные слои гетероструктуры и позволяет

избегать деградации характеристик транзисторов. В результате травления в слое диэлектрика создаются щели шириной порядка 250 нм, которые являются основанием Т-образного затвора транзистора. Одновременно с формированием щелей создаются знаки совмещения для фотолитографии.

Далее, используя взрывную фотолитографию, на основе эвтектического сплава Au/Ge/Ni формируются омические контакты транзистора. После «взрыва» резиста проводится термообработка сформированных на основе Au/Ge/Ni (180 нм/40 нм/10 нм) контактов при температуре 350 – 400 °С. Изоляция транзисторов осуществляется с помощью формирования жидкостным травлением в растворе $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ меза-структур.

Для создания Т-образного затвора над уже сформированной в диэлектрике Si_3N_4 щелью фотолитографией формируется широкая часть затвора. Так как штамп и широкая часть затвора изготавливаются на основе одного и того же шаблона, удастся достичь высокой степени совмещения Т-образного затвора по площади подложки. Травление подзатворной области гетероструктуры до необходимого напряжения отсечки осуществляется в растворе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:160). Осаждение затворной металлизации на основе V/Au (20/200 нм) проводится методом термического испарения. Для пассивации структур на их поверхность методом PECVD осаждается слой Si_3N_4 толщи-

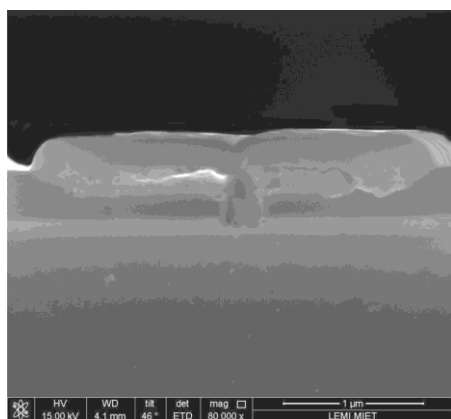


Рис.3. РЭМ-изображение Т-образного затвора транзистора

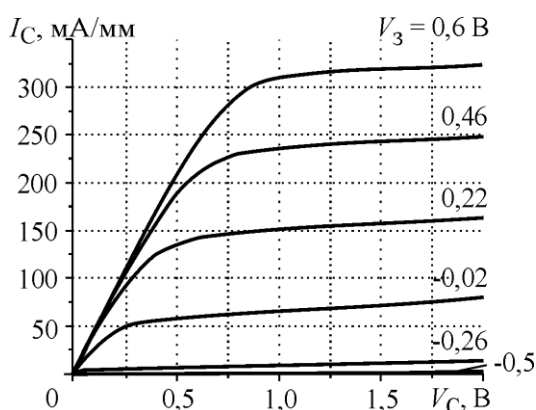


Рис.4. Выходные вольт-амперные характеристики GaAs p-HEMT-транзистора

ной 300 нм. Завершающим этапом формирования транзисторов является формирование фотолитографией разводки металла 1-го уровня.

Параметры Т-образного затвора транзистора исследовались с помощью растрового электронного микроскопа системы FEI Helios. Длина основания затвора составляет 250 нм (рис.3).

Результаты измерения характеристик транзисторов с Т-образным затвором.

Параметры созданных транзисторов по постоянному току исследовались с помощью двухканального блока измерения вольт-амперных характеристик Agilent E5273A. На рис.4 показаны DC-параметры GaAs p-HEMT-транзистора, созданного с применением разработанной методики. Значения измерены на транзисторах с двойным затвором общей шириной 100 мкм, расстояние между омическими контактами составляет 4 мкм. Разработанный транзистор имеет максимальный ток стока $I_C = 325$ мА/мм при $V_3 = 0,6$ В максимальную крутизну g_m более 350 мСм/мм при напряжениях $V_{си} = 1$ В и $V_3 \sim 0,4$ В. Пороговое напряжение транзистора $V_t = 0,39$ В.

СВЧ-характеристики транзисторов получены с помощью анализатора цепей Agilent PNA-X в полосе частот от 10 МГц до 67 ГГц. По измеренным S-параметрам транзисторов рассчитаны частотные зависимости коэффициентов усиления по току H_{21} и максимально достижимые/стабильные коэффициенты усиления (MaxGain) (рис.5). Максимальная частота усиления по току f_t составляет 40 ГГц при $V_{си} = 1,5$ В, максимальная частота усиления по мощности f_{max} равна 50 ГГц при $V_{си} = 3$ В.

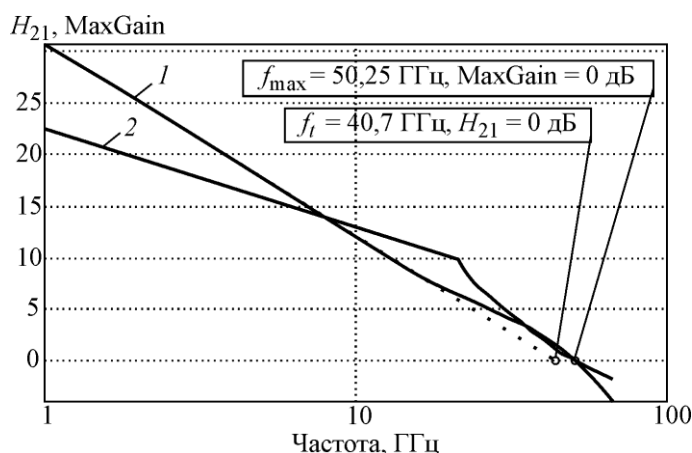


Рис.5. Зависимость коэффициента усиления по току (кривая 1) и максимального коэффициента усиления (кривая 2) от частоты

В таблице обобщены измеренные характеристики разработанного p -HEMT-транзистора, а также приведены соответствующие характеристики транзистора TGF2018 фирмы TriQuint, длина затвора которого составляет 0,25 мкм. Различия в значениях максимальной частоты усиления по мощности объясняются геометрическими параметрами созданного транзистора, а именно расстоянием между стоком и истоком, которое составляет 4 мкм.

Основные характеристики сформированного p -HEMT-транзистора и транзистора TGF2018 фирмы TriQuint [8]

Транзистор	V_b , В	g_m , мСм/мм	f_t , ГГц	f_{max} , ГГц
TGF2018 фирмы TriQuint	-0,4	390	29	~90
Разработанный	-1	360	40	50

Разработана технология изготовления СВЧ-транзисторов с Т-образным затвором с использованием наноимпринт литографии. Длина основания затвора транзистора составляет 250 нм, что соответствует размерам использованного штампа. Измеренные DC- и RF-параметры созданного с применением разработанной методики p -HEMT-транзистора сопоставимы с параметрами СВЧ-транзисторов TGF2018 фирмы TriQuint, длина затворов которых составляет 250 нм.

Оптимизация конструкции транзисторов, а также применение штампов с меньшими топологическими нормами позволяют снизить длину канала транзистора и повысить его рабочие характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 2014/101).

Литература

1. Бобрешов А.М., Хребтов И.В. Аналитическая модель для субмикронных HEMT-транзисторов с учетом короткоканальных эффектов // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – № 3. – С. 14–21.
2. Dyakonov M., Shur M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid // IEEE Trans. Electron Dev. – 1996. – Vol. 43. – Is. 3. – P. 380–387.
3. Peng C., Liang X., Chou S.Y. A novel method for fabricating sub-16 nm footprint T-gate nanoimprint molds // Nanotechnology. – 2009. – Vol. 20. – P. 1–3.
4. Fabrication of high electron mobility transistors with T-gates by nanoimprint lithography / Y. Chen, D. Macintyre, E. Boyd et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2002. – Vol. 20(6). – P. 2887–2890.
5. Schiff H. Nanoimprint Lithography: An old story in modern times? A review // J. Vac. Sci. Technol. – 2008. – Vol. 26 (2). – P. 458–480.
6. Improving stamps for 10 nm level wafer scale nanoimprint lithography / M. Beck, M. Graczyk, I. Maximov et al. // Microelectron. Eng. – 2002. – № 61–62. – P. 441–448.
7. Fabrication of a hard mask for InP based photonic crystals: increasing the plasma-etch selectivity of poly(methyl methacrylat) versus SiO₂ and SiN_x / R. Wüest, P. Strasser, F. Robin et al. // J. Vac. Sci. Technol. – 2005. – Vol. 23 (6). – P. 3197–3201.
8. <http://www.triquint.com/products/p/TGF2018>
9. Dechun G., Kankan Q., Junfeng C., Xiaobin L. A simulation about the influence of the gate-source-drain distance on the AlGaIn/GaN HEMT performance at Ka-band // Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Wireless Technology and Applications (IMWS). – 2012. – P. 1–4.

Статья поступила
12 мая 2014 г.

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* акустоэлектроника, квантовая физика, нанотехнология.

Зайцев Алексей Александрович – аспирант кафедры квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, нанотехнология. **E-mail:** ziko27@yandex.ru

Шмелев Сергей Сергеевич – ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* технология формирования устройств микро- и наноэлектроники.

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2015 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 1000 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции: 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05. E-mail: magazine@miec.ru

<http://www.miet.ru/structure/s/894/e/12152/191>