

К. т. н. В. И. БОСЫЙ, Ф. И. КОРЖИНСКИЙ,
к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО, И. В. СЕРЕДА, Л. Д. СЕРЕДА,
В. В. ТКАЧЕНКО

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие "Сатурн"
E-mail: chmil@nbi.com.ua

Дата поступления в редакцию
21.09 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. Н. ИВАНОВ
(НИИ "Орион", г. Киев)

СОЗДАНИЕ Т-ОБРАЗНОГО ЗАТВОРА В МАЛОШУМЯЩИХ ПОЛЕВЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРАХ

Получены экспериментальные образцы транзисторов с Т-образными затворами высотой 1,1 мкм, длиной нижней части 0,15 мкм и верхней части — 0,8—1,0 мкм.

Расширение частотного диапазона и улучшение эксплуатационных параметров полевых транзисторов может быть достигнуто как за счет использования новых полупроводниковых материалов (гетероэпитаксиальных структур с модулированным легированием, псевдоморфных гетероструктур), так и в результате совершенствования технологии изготовления приборов и оптимизации их топологических размеров.

Одной из ключевых операций изготовления полевых транзисторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн является формирование затвора. При этом для улучшения характеристик транзисторов длину затвора уменьшают вплоть до технологического предела [1]. Одновременно должно быть реализовано его минимальное сопротивление. Наиболее перспективным вариантом в этом случае представляется Т-образный затвор, верхняя (широкая) часть которого служит для уменьшения сопротивления за счет увеличения площади поперечного сечения, а нижняя (узкая) часть обеспечивает малую длину и низкую емкость затвора и, соответственно, высокую предельную частоту прибора f_{\max} [2—5].

Для создания Т-образного затвора применяются методики, основанные на многократной электронно-лучевой литографии, использовании вспомогательных диэлектрических слоев [6, 7], приводящие к усложнению технологического процесса изготовления приборов. Для создания Т-образного затвора возможно также применение многослойных электронных резистов [8]. При этом для получения требуемого профиля важно, чтобы каждый из резистов имел необходимую контрастность и чтобы каждая комбинация "резист/проявитель" имела определенную чувствительность. Используя соответствующие проявители, резисты можно проявлять селективно, и размеры верхней и нижней части затвора будут определяться независимо.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процесса формирования Т-образного затвора с использованием трехслойной структуры, состоящей из двух слоев электронного резиста, разделенных тонким слоем металла.

В технологии GaAs-приборов при формировании металлических межсоединений, в том числе и для затворов, используют в основном так называемую "взрывную" литографию. При "взрывной" литографии маска резиста служит для того, чтобы отделить необходимый металлический рисунок от нижнего материала. При этом слой резистивной маски должен как минимум вдвое превышать толщину металлической пленки. Лишний металл удаляется в результате растворения расположенного под ним слоя резиста.

В данной работе использовали электронный резист ЭЛП-9 на основе высокомолекулярного соединения полиметилметакрилата (ПММА), обладающего достаточно высокой разрешающей способностью в диапазоне энергий экспонирования 20—30 кэВ. Расположение слоев в трехслойной резистивной структуре показано на рис. 1. Толщина первого, нижнего слоя резиста составляет $\approx 0,5$ мкм и обеспечивает получение длины затвора $\approx 0,2—0,3$ мкм. Толщина верхнего слоя резиста $\approx 0,8—1,0$ мкм. Промежуточный слой — пленка металла (Ag) толщиной $\approx 0,1$ мкм, нанесенная в вакууме. Металлический слой препятствует перемешиванию верхнего и нижнего слоев резиста и, кроме того, поглощает значительную часть отраженных от подложки электронов, снижая тем самым негативное влияние эффекта близости.

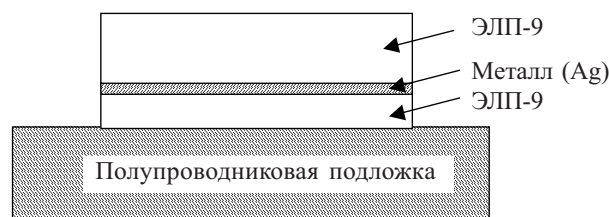


Рис. 1. Схема трехслойной резистивной структуры

Следует отметить, что дополнительной термообработкой в диапазоне температур 100—160°C можно управлять чувствительностью к электронному экспонированию каждого слоя резиста отдельно. Оптимальное соотношение чувствительности верхнего и нижнего слоев составляет 2. В нашем случае нижний слой электронного резиста подвергается повторной (двойной) термообработке, в результате чего его чувствительность к электронному экспонированию несколько снижается. На практике соотношение чувствительности верхнего и нижнего слоев электронного резиста составляет 1,5—2,0.

Составы проявителей для верхнего и нижнего слоев одинаковы, и, следовательно, их селективное проявление возможно только при наличии разделительного слоя (пленки Ag).

В использованной нами трехслойной системе варьирование профилем затвора возможно за счет:

- изменения толщин резиста и разделительного металлического слоя;
- управляемого изменения чувствительности верхнего и нижнего слоев;
- точного управления дозой электронно-лучевого экспонирования.

Основным фактором, ограничивающим разрешающую способность, является обратное рассеяние электронов от подложки, так называемый эффект близости. В случае формирования одиночных топологических структур размером 0,3—0,5 мкм в однослойном резисте толщиной 0,5 мкм в результате эффекта близости уширение линий составляет 0,2 мкм. На рис. 2 представлены профили проявленного изображения в пленке ПММА в зависимости от времени проявления. Такой профиль резистивной маски позволяет формировать близкий к прямоугольному профиль металлизации толщиной до 0,5 мкм.

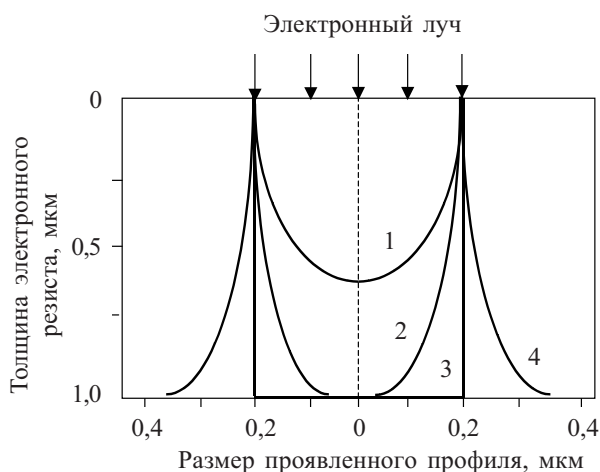


Рис. 2. Профили проявленного изображения в пленке ЭЛП-9 в зависимости от времени проявления:
1 — 1 мин; 2 — 2 мин; 3 — 3 мин; 4 — 4 мин

Последовательность технологических операций при формировании Т-образного затвора показана на рис. 3. Здесь а — исходная пластина после формирования омических контактов; б — нанесение нижнего слоя электронного резиста (1), разделительного слоя (2) металла (Ag) и верхнего слоя электронного резиста (3); в — электронно-лучевое экспонирование; г — проявление верхнего слоя электронного резиста; д — травление разделительного слоя серебра; е — проявление нижнего слоя электронного резиста; ж — травление пленки SiO₂ и верхнего слоя n⁺-GaAs; з — напыление барьерного контакта; и — удаление слоев резиста и серебра (“взрывная” литография).

Нанесение слоев электронного резиста осуществлялось методом центрифугирования, а слоя серебра — напылением в вакууме. Следует отметить, что режим сушки резиста существенно влияет на его чувствительность. Поэтому к стабильности температуры

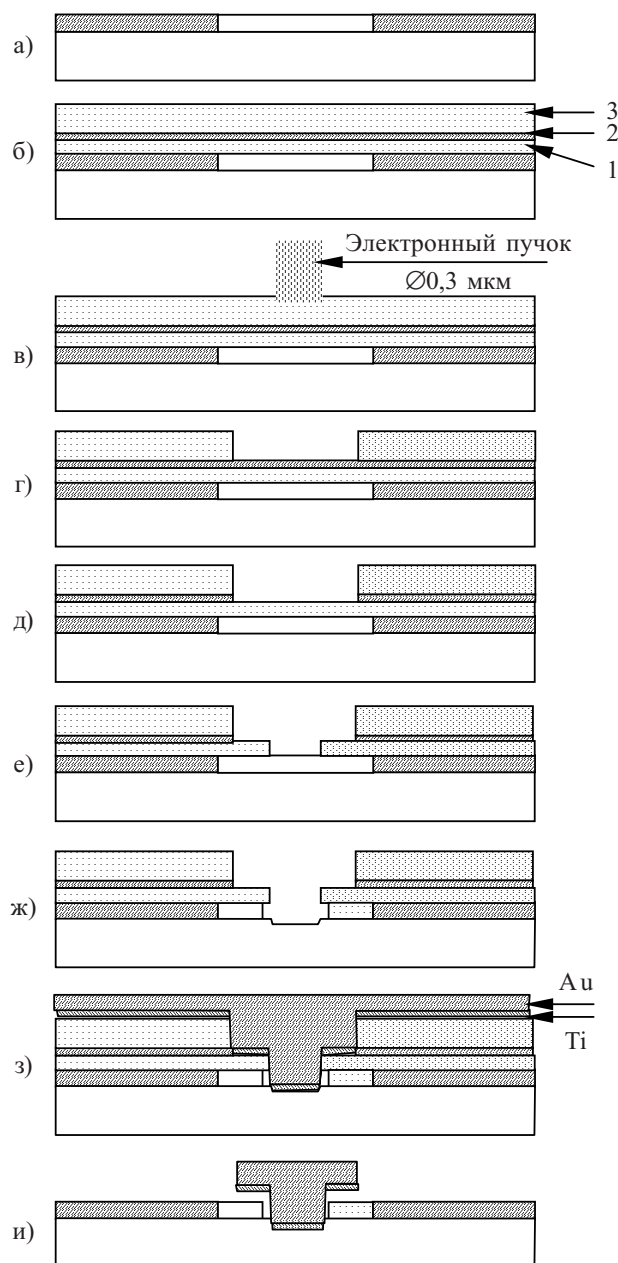


Рис. 3. Последовательность технологических операций при формировании Т-образного затвора

в процессе сушки предъявляются достаточно жесткие требования.

Электронно-лучевое экспонирование осуществлялось на установке ZBA-21. Доза экспонирования составляла $(1...2) \cdot 10^{-5}$ кул/см². Экспонирование базируется на принципе точечного луча, т. е. координаты точек топологии, записанные в памяти вычислительной машины, переносятся на электронный резист путем экспонирования по точкам. Доза облучения резиста определяется экспериментальным путем.

Совмещение осуществляется по маркерным знакам, расположенным по углам рабочих полей и жестко связанным с топологией транзистора. По сетке маркерных знаков проводится юстировка для установления соосности поля маркерных знаков с координатным столиком. После совмещения проводится

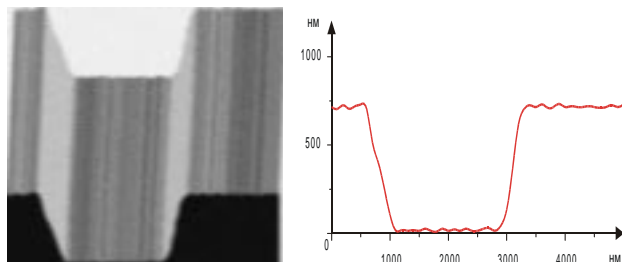


Рис. 4. Профиль омических контактов истока и стока транзистора

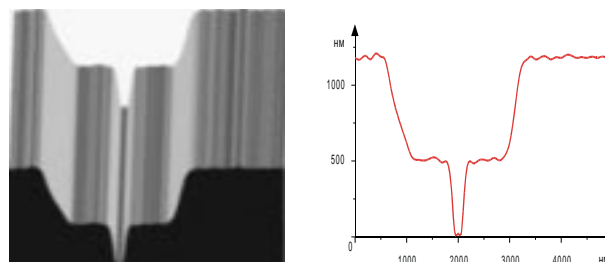


Рис. 5. Двухслойный резист после электронного экспонирования и проявления

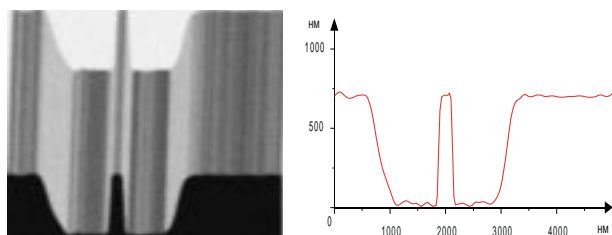


Рис. 6. Профиль металлизации нижней части затвора

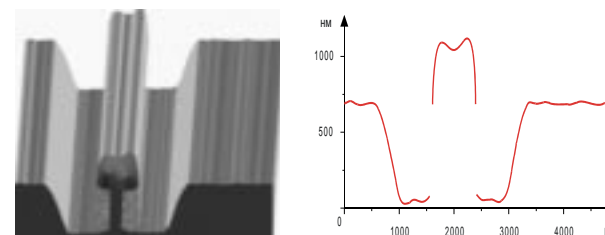


Рис. 7. Профиль металлизации затвора ($h_{\text{MET}}=1,2$ мкм)

экспонирование, по окончании которого вычислительная машина дает команду на перемещение на следующее рабочее поле.

Проявление скрытого изображения в электронном резисте проводилось в смеси изопропилового спирта с метилэтилкетонном в соотношении 3:1 при комнатной температуре. Для травления разделительного слоя серебра использовалась смесь 10%-ных растворов калия железосинеродистого и тиосульфата натрия в соотношении 1:1.

Для увеличения смачиваемости SiO_2 буферным травителем после проявления заданного рисунка пластина подвергалась дополнительной термической обработке при температуре 95°C в течение 3 мин. Время травления SiO_2 определялось на основе предварительного определения скорости травления двуокиси кремния и назначалось на 25—30 секунд дольше, чтобы обеспечить боковое подтравливание SiO_2 в проявленном зазоре. При этом величина подтравки на 0,5—0,7 мкм превышала размер окна в резисте. Это обеспечивает самосовмещение затвора относительно областей стока и истока при дальнейшем напылении металлизации.

После травления SiO_2 производилось вытравливание в раскрытом в SiO_2 окне некоторой части n^+ -слоя арсенида галлия с помощью травителя на основе аммиака и перекиси водорода. Время травления и глубина вытравленной в GaAs канавки корректировались по величине тока между контактами стока и истока. При достижении заданной для данного типа транзисторов величины тока травление GaAs прекращалось и производилось напыление металлизации затвора (пленок титана толщиной 800—900 Å и золота — 1,0 мкм). Затем проводился процесс “взрывной” литографии, в результате которого формируется T-образный затвор.

На рис.4—7 приведены полученные методом атомной силовой микроскопии микрофотографии рабочих образцов при поэтапном формировании T-образного контакта. Исследования показали, что высо-

та затворов экспериментальных образцов транзисторов составляет $\approx 1,1$ мкм, длина нижней части — 0,15—0,2 мкм и верхней части — 0,8 мкм.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность формирования T-образных затворов с помощью однократного электронно-лучевого экспонирования трехслойной системы, состоящей из двух слоев электронного резиста, разделенных тонким слоем металла.

Получены экспериментальные образцы транзисторов с T-образным затвором высотой 1,1 мкм, длиной 0,15—0,2 мкм в нижней части и 0,8—1,0 мкм в верхней части.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yamashita Y., Endoh A., Shinohara K. et al. Pseudomorphic $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$ HEMTs with an ultrahigh f_T of 562 GHz // IEEE Electron Device Lett.— 2002.— Vol. 23.— P. 573—575.
2. S. Noor Mohammad, Hadis Morkoc. MODFETs: operation, status and applications // University of Illinois, Materials Research Laboratory and Coordinated Science Laboratory.— http://www.engineering.vcu.edu/fac/Morkoc/learning/modfet_review.pdf.
3. Lee J. H., Yoon H. S., Park C. S. Ultra low noise characteristics of AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic HEMTs with wide head T-shaped gate // IEEE Electron Device Lett.— 1995.— Vol. 16, N 6.— P. 271—273.
4. Lee J. H., Yoon H. S., Park B. S. et al. Pseudomorphic AlGaAs/InGaAs/GaAs high electron mobility transistors with super low noise performances of 0,41 dB at 18 GHz // ETRI J.— 1996.— Vol. 18, N 3.— P. 171—179.
5. Lee J. H., Yoon H. S., Shim J. Y., Kim H. Device characteristics of AlGaAs/InGaAs HEMTs fabricated by inductively coupled plasma etching // Thin Solid Films.— 2003.— Vol. 435.— P. 139—144.
6. Lee J. H., Yoon H. S., Park B. S. et al. Pseudomorphic AlGaAs/InGaAs/GaAs high electron mobility transistors with super low noise performances of 0,41 dB at 18 GHz // ETRI Journal.— 1996.— Vol. 18, N 3.— P. 171—179.
7. Снегирев В. П., Земляков В. Е., Красник В. А., Темнов А. М. Применение плазменных процессов в технологии СВЧ-транзисторов / <http://files.isuct.ru/istapc2005/proc/6-14.pdf>.
8. Grundbacher R., Adesida I., Kao Y.-C., Ketterson A. A. Single step lithography for double-recessed gate pseudomorphic high electron mobility transistors // J. Vac. Sci. Technol. B.— 1997.— Vol. 15, N 1.— P. 49—52.