

## ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ С ДЛИНОЙ ЗАТВОРА 0.1 МКМ

В. Е. Земляков

ФГУП НПП Исток Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная 2а, 141120

[vzml@rambler.ru](mailto:vzml@rambler.ru)

Традиционная технология СВЧ-транзисторов, основанная на методе взрывной литографии (lift-off), позволяет реализовывать минимальную длину затвора 0.3 мкм (рис. 1).

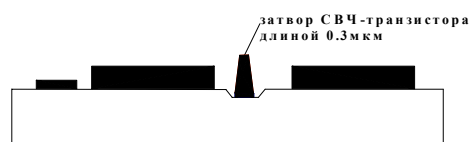


Рис. 1. СВЧ-транзистор по технологии lift-off (метод взрыва)

При дальнейшем уменьшении длины затвора его сопротивление в такой конструкции начинает возрастать, и получить улучшение шумовых и усилительных параметров не удастся. Поэтому в конструкции СВЧ-транзистора используется так называемый Т-образный затвор (рис. 2).

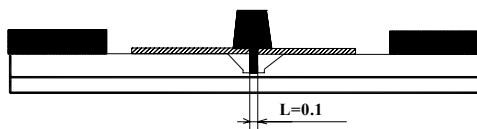


Рис. 2. Транзистор с Т-образным затвором

Такой затвор состоит из нижней части, длиной порядка одной десятой микрона, что позволяет получать большое усиление и высокие рабочие частоты, и довольно широкой, порядка одного микрона верхней частью, что позволяет существенно уменьшить сопротивление затвора [1].

Здесь будут рассмотрены методы, реализующие такую конструкцию. Для этого необходимо решение следующих задач, связанных с применением плазменных процессов:

- нанесение на подложку арсенида галлия пленок диэлектриков  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной порядка 0.1–0.3 мкм с малым разбросом по толщине по площади пластины;
- травление щели в этих диэлектриках с вертикальной стенкой и с размерами в плане 0.1 мкм и получение при этом селективности маски по отношению к травленому слою не менее 1:2.

Следует отметить, что существует несколько способов решения этих задач. Для получения таких покрытий были исследованы несколько способов нанесения диэлектрических пленок на подложки из GaAs. Проводились опыты по получению пленок магнетронным, электронно-лучевым методами, а также по осаждению пленок из плазмы  $\text{SiH}_4$  с возбуждением плазмы ВЧ-источником на частоте 13.56 МГц, с возбуждением плазмы ЭЦР-источником (электронно-циклотронный резонанс) на частоте 2.45 ГГц, с возбуждением плазмы методом ИСП (индуктивно-связанная плазма) и с различными комбинациями источников, позволяющими получать плазму различной плотности, энергетики и состава радикалов вблизи поверхности подложки.[2, 3, 4].

Пленки диэлектриков, полученные методом магнетронного распыления, обладали хорошей адгезией к GaAs, однако несли в себе большой встроенный заряд, оказывающий

отрицательное влияние на токи насыщения полевых СВЧ-транзисторов, а пленки, полученные электронно-лучевым методом, не показали достаточной адгезии к подложке GaAs.

Пленки, полученные методом плазменного осаждения, обладают хорошей адгезией к GaAs и не изменяют характеристик транзисторов.

Исследования таких пленок методами эллипсометрии, инфракрасной спектроскопии, оже-спектроскопии, проводимые как за рубежом, так и в России показали, что пленки, осажденные из плазмы, содержат ряд примесей, таких как примеси водорода, кислорода и кремния [5]. Эти примеси могут кардинальным образом изменять физические и химические свойства пленок, такие как, например, селективность травления пленки диэлектрика, показатель преломления и тангенс диэлектрических потерь, столь важные при производстве СВЧ-транзисторов. При этом оказывается, что диэлектрик, подходящий для получения узких щелей, не очень подходит для пассивации приборов из-за его высокой химической активности и малой плотности, то есть высокой проницаемости. В производстве оказывается важным не метод возбуждения плазмы, не плотность плазмы, а возможность управления параметрами плазмы, такими как рабочее давление, величина автосмещения, расходы газов, скорость согласования плазмы, возможность контроля процессов осаждения и травления.

Процесс сухого травления диэлектрических слоев  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  через маску из органических фоторезистов и электронорезистов используется в технологии СВЧ-полупроводниковых приборов для создания затвора полевого СВЧ-транзистора с малой длиной (до 0.1 мкм) [6].

Для этого необходимо в пленке диэлектрика толщиной более 0.1 мкм вытравить щель с вертикальными стенками и с ровным краем травления для последующего анизотропного химического травления подложки из арсенида галлия.

Технология электронно-лучевой литографии позволяет формировать маску для сухого травления в электронорезисте с минимальным размером порядка 0.1 мкм. Проводился целый ряд исследований методов сухого травления пленок диэлектриков через такую маску. Исследовались методы плазменного травления в диодной системе, в плазме высокой плотности с индуктивным возбуждением на частоте 13,56 МГц и в плазме высокой плотности на частоте 2,45 ГГц в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Общий вывод таков: во фторуглеродной плазме электронный резист обладает высокой скоростью травления, что зачастую не позволяет получить требуемую степень анизотропии и селективности для получения щели с вертикальными стенками [7]. Различные группы исследователей по-разному решают эту задачу. Один путь – это добавка к основным плазмообразующим газам ( $\text{CF}_4$ ,  $\text{SF}_6$ ), газа, склонного к образованию полимерных пленок, например  $\text{CHF}_3$ . Другой путь – разработка процесса осаждения диэлектриков с повышенными скоростями травления, это достигается путем введения определенного процента водорода в диэлектрик. Также требуется, чтобы процесс травления в плазме обладал хорошей анизотропией, чтобы получить щель в диэлектрике с минимальным размером 0.1 мкм (см. рис. 3), при этом необходим строгий контроль энергетики процесса, чтобы не внести необратимых разрушений в эпитаксиальные пленки арсенида.

На рис. 4. показан Т-образный затвор СВЧ-транзистора с длиной порядка 0.1 мкм, изготовленный в соответствии с вышеизложенной идеологией [8], то есть плазменные технологии позволили разработать технологический маршрут изготовления транзисторов с размерами до 0.1 мкм и изготовить СВЧ-полевой транзистор с Т-образным затвором. Именно такие транзисторы, по зарубежным данным, позволяют добиться качественного улучшения динамических характеристик и повысить рабочие частоты до 100 ГГц.

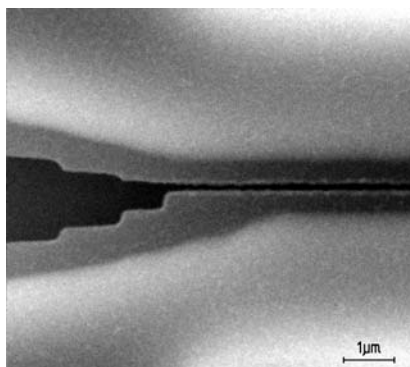


Рис. 3. Затворная щель в нитриде кремния и вытравленный анизотропным химическим травлением арсенид галлия

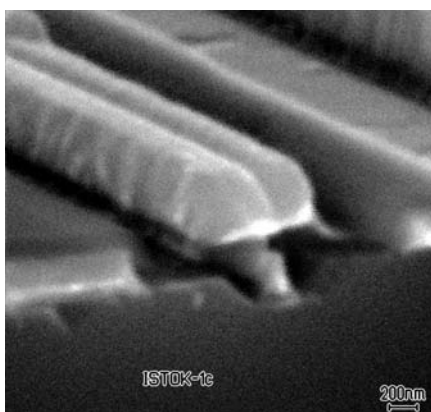


Рис. 4. Сформирован Т-образный затвор с минимальным размером порядка 0.1 мкм.

#### **Литература:**

1. Kalna K. et al. // *Solid-State Electronics*. 2002. V. 46. P. 631–638.
2. Wakita A. S. et al. // *J. Vac. Sci. Technol.* 1995. V. B,13. P. 2725.
3. Shapoval S. Y. et al. // *Vacuum*. 1992. V. 43(3). P. 199.
4. Reinberg A. R. // *J. Electron. Mater.* 1979. V. 8. P. 345.
5.  $A_3B_5$  // *Review the advanced semiconductor magazine*. 2002. V. 15. № 9.
6. Bollaert S. et al. // *Solid-State Electronics*. 2000. V. 44. P. 1021–1027.
7. Jinno K. // *Japan J. Appl. Phys.* // 1978. V. 17. № 7 P. 1283.
8. Gurtovoi V. L. et al. Abstracts 26 Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits held in Europe. Fabrication of the microwave GaAs MESFET with T-shaped sub-100 nm gate.