

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ.

Снегирев В.П., Земляков В.Е., Красник В.А., Темнов А.М.

ФГУП НПП Исток

Московская обл., г. Фрязино, ул. Вокзальная 2а, 141120

vzml@rambler.ru

В настоящее время в России наметилось существенное отставание в части разработок элементной базы приемопередающих модулей СВЧ-диапазона, связанное с отсутствием специализированных монокристаллических схем, которые реализованы на транзисторах с минимальными размерами в активном элементе порядка 0.1 мкм. В первую очередь, это вызвано отсутствием технологических процессов, позволяющих реализовать данные размеры.

Традиционная технология, основанная на методе взрывной литографии (lift-off) позволяет реализовывать минимальную длину затвора 0.3 мкм. 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. 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. Для технологии изготовления таких транзисторов характерно нанесение диэлектриков и металлизации с малым разбросом (один-два процента) по толщине, по площади подложки до трех дюймов, а также использование плазменных методов травления, позволяющих получать высокую селективность и анизотропию травления, то есть травить металлы, диэлектрики и эпитаксиальные пленки полупроводников с вертикальными стенками.

Данная работа направлена на поиск технологических решений, позволяющих реализовать такую конструкцию. Для этого необходимо было провести разработку следующих технологий:

- технологии нанесения на подложку арсенида галлия пленок диэлектриков SiO_2 , Si_3N_4 толщиной порядка 0.1-0.3 мкм с малым разбросом по толщине по площади пластины,
- технологии травления щели в этих диэлектриках с вертикальной стенкой и с размерами в плане 0.1 мкм,

Диэлектрики SiO_2 , Si_3N_4 используются в технологии СВЧ-полупроводниковых приборов в качестве пассивирующих покрытий, а также в качестве маски, задающей малые размеры затвора транзистора (до 0.1 мкм), при напылении затворной металлизации и травлении эпитаксиальных пленок GaAs.

Для получения таких покрытий были исследованы несколько способов нанесения диэлектрических пленок на подложки из GaAs. Проведены опыты по получению пленок магнетронным, электронно-лучевым методом, а также по осаждению пленок из плазмы SiH_4 с возбуждением плазмы ВЧ-источником на частоте 13.56 МГц и с возбуждением плазмы ЭЦР-источником на частоте 2.45 ГГц (ИПТМ РАН).

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, проведенные в ИПТМ РАН показали, что пленки,

осажденные из ЭЦР-плазмы, содержат примеси водорода, кислорода и кремния меньше, чем пленки, осажденные ВЧ-плазмой, и обладают лучшей однородностью состава по толщине пленки. Разброс по толщине пленок на пластине диаметром 50мм при толщинах 0.1-0.3мкм составил не более 3%. Поэтому для изготовления Т-образного затвора были использованы пленки осажденные методом ЭЦР-плазмы и радиочастотной плазмы.

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 0.1мкм).

Для этого необходимо в пленке диэлектрика толщиной более 0.1мкм 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 0.1 мкм. Проводились исследования методов сухого травления пленок диэлектриков через такую маску. Исследовались методы плазменного травления в диодной системе, в плазме высокой плотности с индуктивным возбуждением на частоте 13,56МГц и в плазме высокой плотности на частоте 2,45ГГц в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). В диодной системе процесс плазменного травления во фторуглеродной плазме не обладал достаточной степенью анизотропии для получения щели с вертикальными стенками. Поэтому минимальный размер, полученный по этому способу, составил 0.4 мкм. Процесс травления в плазме высокой плотности обладает хорошей анизотропией, что позволило получить щель в диэлектрике с минимальным размером 0.2мкм (см. Рис.3), однако высокая энергетика процесса приводила к пассивации поверхности арсенида галлия, что не позволило провести анизотропное химическое травление. Процесс травления в ЭЦР-плазме обладает как достаточной анизотропией травления, так и малой энергетикой, что позволило получить минимальный размер 0.1мкм и провести качественное анизотропное химическое травление подложки арсенида галлия (см. Рис.4).

Рис.5 иллюстрирует изготовление Т-образного затвора. На экспериментальной партии получены транзисторы с затвором длиной порядка 0.1мкм.. Следует отметить, что проведенные измерения низкочастотных параметров показали уменьшение удельной емкости затвор-сток на пятьдесят процентов, а сопротивление затвора уменьшилось в четыре раза по сравнению с транзисторами изготовленными методами традиционной взрывной литографии. .

Итак плазменные технологии позволили разработать технологический маршрут изготовления транзисторов с размерами до 0.1мкм 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 100ГГц.

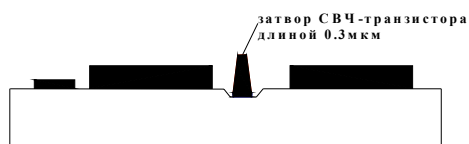


Рис.1. СВЧ-транзистор по технологии lift-off (метод взрыва).

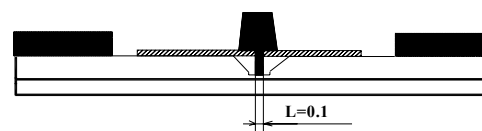


Рис.2. Транзистор с Т-образным затвором

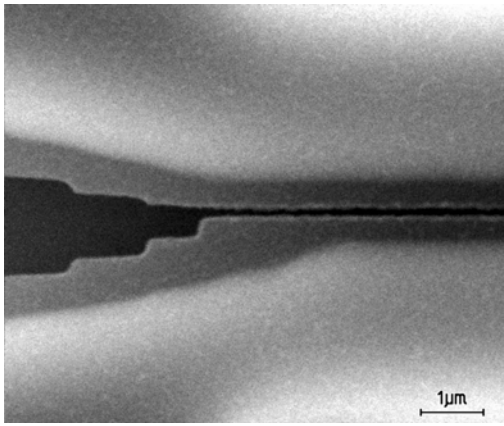


Рис3. Затворная щель в нитриде кремния (плазма высокой плотности).

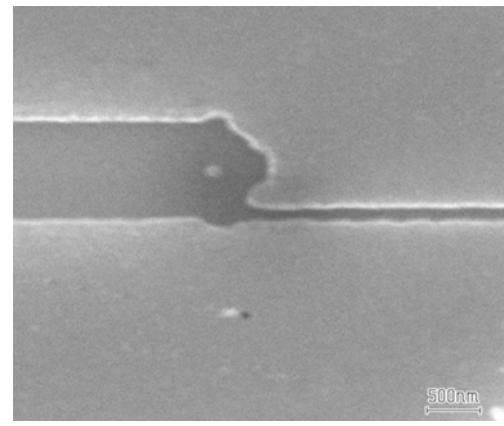


Рис.4. Затворная щель в нитриде кремния (ЭЦР-плазма 2.45ГГц)

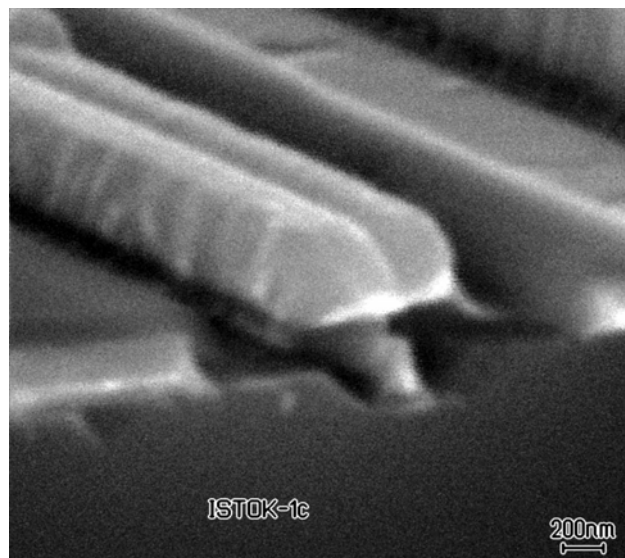


Рис 5. Сформирован T-образный затвор с минимальным размером порядка 0.1 мкм.