

самые различные дефекты. Дефекты с $n=1$ не дают особенности при $f \rightarrow 0$, дефекты с $n=2$ дают логарифмическую особенность и реагируют быстрее, дефекты с $n=3$ дают спектр $1/f$.

2. Движение дислокаций по образцу. Дислокации движутся и возникают из-за механических напряжений, которые появляются при изготовлении образца. Отжиг не снимает напряжение полностью, например, для пленок из-за различия коэффициентов теплового расширения пленки и подложки, и даже может ввести новые напряжения.

Одна из гипотез холодного ядерного синтеза предполагает возникновение сильных локальных полей при появлении микротрещин. Аналогичные эффекты могут быть при движении дислокаций. Поэтому рассмотрение нелинейных механизмов является вполне оправданным.

Мы рассматривали частный случай — токовые шумы. Однако, на наш взгляд, можно сделать выводы и для общего случая. Для фликкерного шума нужна нелинейная динамическая система и случайное импульсное воздействие со стационарными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Handel P. H. // Phys. Rev. 1980. A22. P. 745.
2. Герценштейн М. Е., Коротков А. Н., Потемкин В. В., Степанов А. В. // Изв. вузов, Радиофизика. 1991. 34, № 1. С. 47.
3. Handel P. H. // Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik. 1989. 43. P. 261.
4. Потемкин В. В., Степанов А. В. // Радиотехн. и электроника. 1980. 25, № 6: С. 1269.

Поступила в редакцию
15.03.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 6

РАДИОФИЗИКА

УДК 533.9.038

ПРИМЕНЕНИЕ ЗОНДА ЛЕНГМЮРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ОКОНЧАНИЯ ПРОЦЕССА ТРАВЛЕНИЯ SiO_2 НА КРЕМНИИ

А. П. Ершов, А. В. Калинин, Я. Н. Суханов, К. В. Руденко

(кафедра физической электроники)

В плазмохимическом реакторе диодного типа с помощью зондового метода исследована эволюция параметров плазмы C_2F_6 в процессе травления слоя SiO_2 на кремнии. Показана возможность использования зонда Ленгмюра для определения момента окончания процесса травления.

1. Введение

Использование процесса сухого травления в технологии изготовления интегральных схем требует жесткого контроля параметров плазмы. Помимо контроля селективности, скорости, равномерности и анизотропии травления, несомненный интерес представляет идентификация времени окончания травления.

Из всего разнообразия методов диагностики плазмы традиционно используются две группы: оптические и масс-спектрометрические. Однако метод масс-спектрометрии достаточно дорог, а интерпретация результатов оптических методов может быть весьма сложной.

В настоящей работе для изучения эволюции параметров плазмы низкочастотного разряда в C_2F_6 в процессе травления слоя SiO_2 на

кремнии и возможности определения момента окончания травления в диодном плазмохимическом реакторе использован одиночный зонд Ленгмюра.

Перспективность использования метода связана с высокой чувствительностью зонда к изменению внутренних параметров плазмы разряда, возможностью регистрации временного хода зондового тока или эволюции вольт-амперной характеристики (ВАХ); простотой технической реализации метода, а значит, и приемлемой стоимостью.

2. Аппаратура и методика измерений

Измерения проводились на установке плазмохимического травления с реактором диодного типа (диаметр электродов 12,5 см, расстояние между ними 2,5 см), в котором возбуждался разряд на частотах 10—100 кГц.

Применялся вольфрамовый цилиндрический зонд диаметром 0,3 мм и длиной рабочей части 6 мм. Он располагался в центре разрядной камеры параллельно электродам на равном расстоянии от них. Противозондом служил заземленный электрод. Таким образом, рабочая поверхность зонда находилась на оси кремниевой пластины (диаметр 60 мм, толщина слоя SiO_2 0,7 мкм) на расстоянии ~ 10 мм от ее поверхности.

Для проведения зондовых измерений использовалась схема стробируемого интегрирования, подробно описанная в работе [1] и позволяющая проводить измерения с временным разрешением. Ее суть заключается в том, что измерительный импульс (длительностью не более 1 мкс) привязывается к фазе питающего напряжения, при этом он располагается «внутри» открывающего импульса длительностью в несколько микросекунд. Это позволяет исключить процессы, связанные с формированием зондового слоя и установлением тока, соответствующего приложенному напряжению.

Схема управляется ЭВМ, которая задает напряжение смещения на зонде U от 0 до 200 В с помощью источников напряжения типа Б5. Измеряемый сигнал подается на вход интегрирующей RC-цепи с достаточно большой постоянной времени ($\sim 10^{-2}$), при этом полезный сигнал накапливается, а его флуктуации усредняются. Соответствующие значения тока при каждом значении смещения посредством АЦП измеряются и записываются в файл накопления. До начала измерений напряжение на зонде соответствует режиму глубокого ионного тока, поддерживая очистку поверхности зонда за счет бомбардировки ионами. Типичное время снятия одной кривой порядка 1 с. По сути оно лимитируется скоростью переключения напряжения смещения в источнике питания. Схема обеспечивает многократное снятие ВАХ зонда, позволяя контролировать изменение параметров плазмы во времени.

Кроме того, в работе использовалась более простая схема, при которой на самописце с временной разверткой регистрировалось изменение зондового тока в процессе травления при фиксированном напряжении на зонде. Выбирая рабочую точку U_z на ВАХ, можно было наблюдать за изменением или электронного, или ионного зондового тока.

Измеренные ВАХ зонда затем обрабатывались на ЭВМ по методике, подробно изложенной в [1]. Здесь кратко отметим, что в плазме электроотрицательных газов низкие значения концентрации электронов при высоком уровне шумов диктуют необходимость увеличения поверхности зонда для обеспечения приемлемого отношения сигнал/шум. Как следствие, при увеличении давления рабочего газа появляется необхо-

димостью учета «стока» электронов на зонд и сопротивления столба плазмы между зондом и опорным электродом.

Приведенные ниже экспериментальные результаты были получены при частоте питающего напряжения $f=25$ кГц, вкладываемых мощностях $W=50-150$ Вт, давлении рабочего газа C_2F_6 $p \approx (5 \div 20) \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. и его расходах $G \approx 30$ см³/мин.

Выбор частоты f и рабочего давления p в данном случае был обусловлен прежде всего желанием минимизировать возможные методические погрешности: при указанных значениях параметров минимальна неустойчивость разряда и связанные с ней шумы в измерительной цепи. Кроме того, измерения проводились в фазе питающего напряжения, соответствующей максимуму отрицательного напряжения на высоковольтном электроде. В этом случае обеспечивается наименьшее изменение потенциала плазмы в месте нахождения зонда за время измерения, а значит, и минимум искажения ВАХ зонда.

3. Экспериментальные результаты

1°. Эволюция зондового тока при фиксированном потенциале зонда. Регистрация изменения зондового тока на самописце при фиксированном напряжении смещения является наиболее простой и удобной для контроля процесса травления. Типичные результаты показаны на рис. 1, а, б. В случае (а) рабочая точка

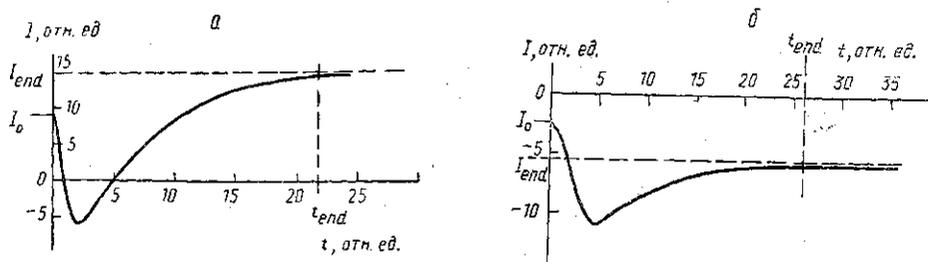


Рис. 1. Изменение зондового тока в процессе травления: а — электронный ток, $U_z \approx U_f$; б — ионный ток, $|U_z| > |U_f|$

на ВАХ выбиралась в электронной части (между потенциалом пространства и плавающим потенциалом), в случае (б) — в ионной части. Нетрудно видеть, что зондовый ток может (если рабочая точка выбрана вблизи плавающего потенциала) менять знак (см. рис. 1, а). Во всех случаях зависимость тока от времени проходит через экстремум и выходит на насыщение. Начальное I_0 и конечное I_{end} значения тока, как правило, отличаются. Выход зондового тока на новое стационарное значение обусловлен полным стравливанием слоя SiO_2 и установлением новых параметров плазмы (см. ниже), соответствующих медленному взаимодействию рабочего газа с поверхностью кремниевой пластины. Характерно, что время насыщения зондового тока линейно зависит от мощности питающего генератора. Повышение давления рабочего газа ускоряет процесс насыщения. Таким образом, наблюдаемые зависимости коррелируют с известными зависимостями скорости травления от мощности разряда и давления рабочего газа.

2°. Эволюция ВАХ и параметров разряда в процессе травления. Эволюция ВАХ в процессе травления показана на рис. 2 (для удобства представления изменения электронной и

ионной частей показаны отдельно). Здесь же приведена ВАХ, измеренная в разряде в отсутствие пластины. Заметим, что электронная ветвь

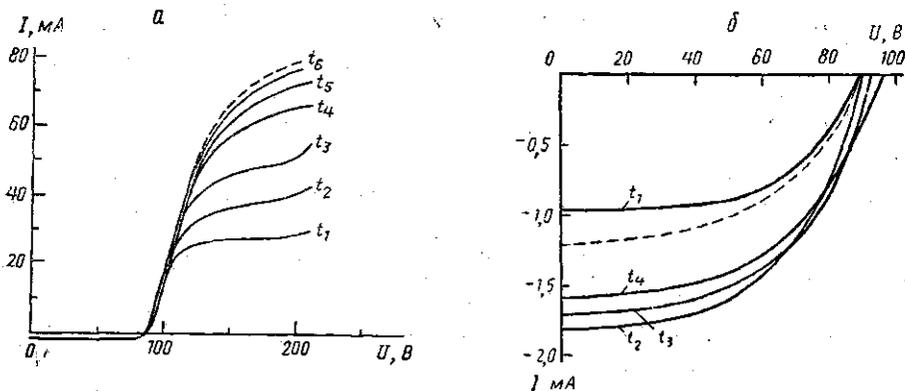


Рис. 2. Эволюция ВАХ в процессе травления: а — электронная ветвь, $t_1=1$ с, $t_2=33$ с, $t_3=53$ с, $t_4=73$ с, $t_5=111$ с, $t_6=125$ с; б — ионная ветвь, $t_1=1$ с, $t_2=73$ с, $t_3=111$ с, $t_4=125$ с. Штриховая линия — ВАХ разряда без пластины

зондовой кривой на стадии травления монотонно приближается к кривой в отсутствие пластины, а ионная ветвь эволюционирует немонотонно.

Результаты определения параметров плазмы: концентрации электронов n_e и положительных ионов n_+ , потенциала пространства U_0 и плавающего потенциала U_f показаны на рис. 3, 4. Доля отрицательных ионов n_- находилась из условия квазинейтральности плазмы: $n_- = n_+ - n_e$.

Собственно плазма C_2F_6 характеризуется в данных условиях относительно невысокой концентрацией отрицательных ионов: $n_+/n_e \approx 4$. В то же время, например, для плазмы CF_3Br в этом же плазмохимическом реакторе отношение $n_+/n_e \approx 600$ [1]. В процессе травления SiO_2 концентрация отрицательных ионов растет, отношение n_+/n_e достигает величины $n_+/n_e \approx 10$ (см. рис. 3). Увеличение доли отрицательных ионов при травлении окисла разумно объяснить поступлением ионов O^- в разряд. К концу травления значения концентрации заряженных частиц начинают приближаться к уровню, соответствующему разряду без пластины. Отметим, что изменение эффективной температуры электронов T_e в процессе травления лежало в пределах ошибки измерений: абсолютные значения T_e составляли 6—7 эВ.

На рис. 4 показаны результаты измерений потенциала пространства и плавающего потенциала с пластиной и без пластины. Видно, что внесение пластины в разряд приводит к некоторому изменению абсолютных величин U_0 и U_f . Из рис. 4 ясно, что изменение ионного тока в процессе травления, регистрируемое самописцем (см. рис. 1, б), обусловлено изменением концентрации положительных ионов, а более значительные изменения в электронной ветви (включая смену знака — т. е. переход в ионную ветвь) связаны прежде всего с изменением потенциала пространства в месте расположения зонда, поскольку $I_e \approx \exp\{-e(U-U_0)/kT_e\}$.

Таким образом, результаты, полученные в настоящих экспериментах, показывают, что метод зондов Ленгмюра можно использовать для идентификации момента окончания травления. Наиболее простой яв-