

# ФОРМИРОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ТРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Е. А. Абрамова, И. С. Суровцев

Воронежский государственный университет,  
394000, г. Воронеж, Университетская пл., [I.silva@niif.vsu.ru](mailto:I.silva@niif.vsu.ru)

В работе [1] предложен способ безмасочного локального травления материалов микроэлектроники, для чего использовался разряд, формирующийся у выступающих элементов электрода непосредственно над участками поверхности подлежащими обработке (рис.1). В настоящей работе для возбуждения разряда использовалось ВЧ напряжение ( $U_{ВЧ}$ ) частотой 13.56 МГц. Установлено, что для локализации разряда при межэлектродных расстояниях ( $L$ ) равных  $10 \div 100$  мкм, давление плазмообразующего газа ( $p$ ) должно быть  $10^3 \div 10^2$  Торр. При указанных значениях  $L$  объем разряда чрезвычайно мал и, в зависимости от площади обрабатываемой поверхности, он может составлять от 0.01 до 100 мм<sup>3</sup>. Это позволяет без дополнительных затрат электроэнергии получать плотность мощности в разряде на 4-5 порядков большую, чем в традиционных системах плазменного травления. Скорость травления материалов таким разрядом на несколько порядков превышает скорости, достигаемые при плазмохимическом травлении. Например, в газе SF<sub>6</sub> для Si и SiO<sub>2</sub> их значения достигают 4 и 0.5 мкм/с, соответственно.

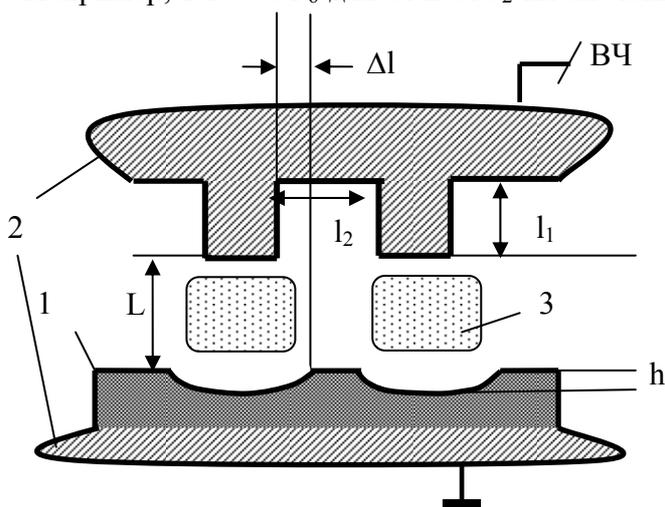


Рис. 1. Модель травления ЛГР.

1 - обрабатываемый материал;  
2 - электроды; 3 - плазма.

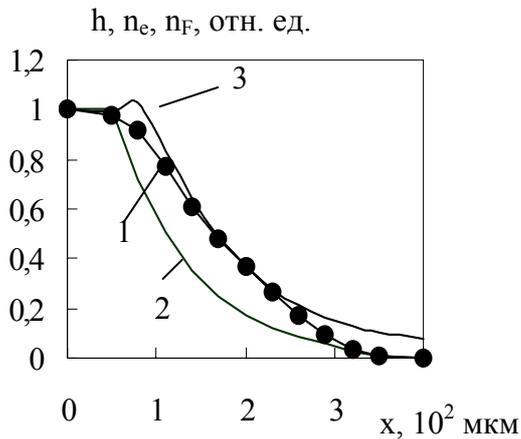
Большие скорости травления локализованным газовым разрядом (ТЛГР) обусловлены высоким давлением и степенью диссоциации газа. Согласно спектральным исследованиям ЛГР, концентрация атомов фтора ( $n_F$ ) в газах SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub> может превышать концентрацию исходных молекул. Ввиду того, что объем ЛГР, как правило, на много порядков меньше объема рабочей камеры,  $n_F$  в нем остается постоянной в течение десятков минут, как в отсутствие травящегося материала, так и при его наличии. Это дает возможность проводить травление в замкнутом объеме. В этом случае плазмообразующий газ поступает в зону горения разряда за счет диффузии.

Процесс локализации разряда имеет высокую чувствительность к глубине гравировки рисунка на электроде ( $l_1$ ). В качестве поверхности такого электрода, например, использовалась кремниевая пластина с напыленным на нее слоем алюминия толщиной один микрон, с выполненной по нему гравировкой заданного рисунка. С помощью такого электрода при  $L = 200$  мкм,  $U_{ВЧ} = 160$  В,  $P = 115$  Торр в газе SF<sub>6</sub> было получено в слое SiO<sub>2</sub> толщиной 0.3 мкм “негативное” изображение представленного на нем рисунка.

Показатель анизотропии ( $A$ ) ТЛГР принимается равным отношению глубины травления ( $h$ ) к величине растрова за пределы проекции элемента электрода на обрабатываемую поверхность ( $\Delta l$ ). Установлено, что  $A$  растет при повышении  $p$  и электроотрицательности плазмообразующего газа, а так же при уменьшении  $L$ . С другой стороны повышение давления при фиксированном  $L$  приводит к росту напряжения зажигания разряда, что может вызвать его контракцию вследствие перегрева газа. В

этой связи возможности управления скоростью ТЛГР при фиксированных  $p$  и  $L$  путем изменения  $U_{вч}$  ограничены, и его следует проводить с помощью разбавления химически активных газов инертными.

В работе [2] сделано предположение, что увеличение  $A$  с ростом давления обусловлено главным образом уменьшением области горения разряда, а не диффузионной длины незаряженных химически активных частиц. Для оценки влияния заряженных и нейтральных компонентов ЛГР на профиль травления было проведено математическое моделирование их пространственно-временных распределений под одиночным прямоугольным ВЧ электродом, длина которого много больше ширины, для участка



**Рис. 2.** Распределение глубины травления Si (1); концентраций электронов (2) и фтора (3).

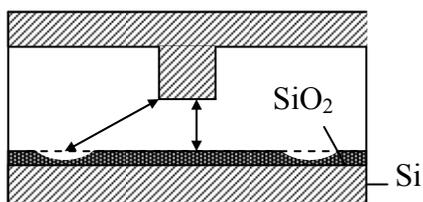
Газ – SF<sub>6</sub>,  $p = 76$  Торр,  $L = 100$  мкм.

разрядного промежутка, удаленного от краев электрода на расстояние достаточное для устранения влияния краевых эффектов [3]. Учитывая процессы диссоциации, рекомбинации и диффузии плазмообразующих частиц, а также процессы прилипания электронов к молекулам были составлены системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных описывающие состав плазмы газов SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub>. Принималось, что напряженность электрического поля ( $E$ ) и концентрация электронов ( $n_e$ ) под электродом однородны, а за пределами электрода  $n_e \sim E/p$ . Предполагалось, что электроны имеют Максвелловское распределение по энергиям. На рис. 2 представлены распределения рассчитанных концентраций электронов и фтора, а также

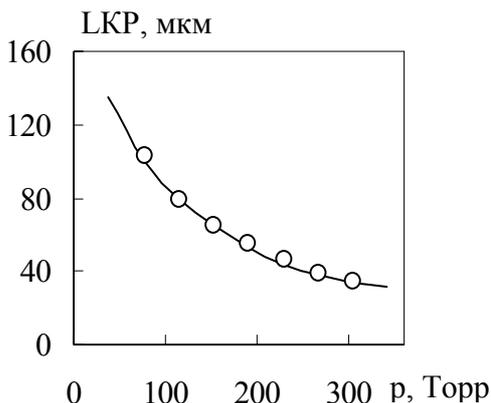
экспериментально полученной при тех же условиях глубины травления канавки в кремнии. Координата  $x$  отсчитывалась от центра разрядного промежутка. Из рисунка видно, что электроны локализируются в объеме меньшем, чем незаряженные компоненты, и границы профиля травления определяются пространственным распределением электронов. Это распределение определяет область горения разряда. Процесс травления в этой области по своим характеристикам аналогичен плазмохимическому. Установлено, что травление кремния ЛГР имеет изотропный характер. При этом селективность травления Si/SiO<sub>2</sub> в газе SF<sub>6</sub> составляла в различных режимах 5 ÷ 8, а в газе CF<sub>4</sub> - 0,4 ÷ 0,6. Проникновение незаряженных химически активных частиц за пределы области горения разряда может обуславливать протекание там радикального травления. Однако протеканию такого рода травления, как правило, препятствует интенсивное осаждение продуктов реакций, поступающих из зоны горения разряда. Учитывая также, что скорость радикального травления на порядок меньше скорости травления в зоне разряда, можно заключить, что пространственное распределение нейтральных компонентов не оказывают существенного влияния на разрешающую способность ТЛГР. Данный вывод в наибольшей степени справедлив в отношении тех процессов, протекание которых лимитируется ионной бомбардировкой поверхности. Например, для травления SiO<sub>2</sub> в плазме SF<sub>6</sub>. Таким образом, в результате проведенного моделирования установлено, что область горения разряда уменьшается с ростом  $p$  и электроотрицательности газа, а также при уменьшении межэлектродного расстояния. Это согласуется с результатами экспериментальных исследования разрешающей способности ТЛГР.

Однако возможность уменьшения  $L$  ограничена не только техническими трудностями, но и физическими свойствами самого разряда, а именно,  $L$  не может быть меньше ширины катодного слоя ( $d_{cs}$ ). При фиксированной длине свободного пробега электрона и слишком маленьком  $L$  электронная лавина не образуется непосредственно

под электродом. При уменьшении  $L$  до некоторого «критического» значения  $L_{кр}$  наблюдается зажигание разряда по периметру выступающего элемент электрода там, где



**Рис. 3.** Иллюстрация ТЛГР по периметру электрода.



**Рис. 4.** Зависимость LKP от давления газа. Газ – SF<sub>6</sub>.

количество столкновений электронов с молекулами оказывается достаточным для образования электронной лавины (рис.3). Для нахождения зависимости  $L_{кр}$  от  $p$  был проведен ряд экспериментов по травлению SiO<sub>2</sub> на Si в плазме SF<sub>6</sub> при  $l=100$  мкм и  $L < L_{кр}$  (рис. 4). Установлено, что  $L_{кр}$  существенно не меняется с величиной тока, что связано с постоянством падающего на нем напряжения.

Результаты исследований ЛГР показали, что его вольтамперные характеристики соответствуют  $\gamma$  форме тлеющего разряда. Установлено, что оптимальное значение  $P \cdot L$  составляет  $\sim 10^{-2}$  Торр·м.

Локализованный газовый разряд позволяет проводить размерное травление материала без применения традиционных масок, что дает возможность исключить дорогостоящие литографические операции из технологического процесса. По мере увеличения разрешающей способности данного метода область его применения будет расширяться.

В то же время, учитывая высокую скорость ТЛГР, его можно эффективно использовать для быстрого удаления значительных слоев материалов

как через традиционно используемые маски, так и для травления открытых поверхностей. Например, для снятия нарушенного слоя на кремниевых пластинах или для уменьшения их толщины после завершения формирования приборов на рабочей стороне. Стремление ЛГР формироваться у выступающих участков обрабатываемой поверхности позволяет также использовать его для полировки пластин. Лабораторные исследования показали, что ТЛГР может успешно использоваться для вскрытия контактных окон в SiO<sub>2</sub> при изготовлении фотопреобразователей, а также для разделения кремниевых пластин на кристаллы.

В результате спектральных исследований ТЛГР, проводимого в газах SF<sub>6</sub> и CF<sub>4</sub>, установлено, что переход от слоя одного обрабатываемого материала к другому сопровождается значительным изменением  $n_F$  в разряде, что позволяет проводить оптический контроль окончания травления слоев.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2091904 Россия, 27.09.1997. Способ локального плазмохимического травления материала / Абрамов А. В., Дикарев Ю. И., Суровцев И. С.
2. Абрамов А. В., Абрамова Е. А., Суровцев И. С. Травление материалов локализованным газовым разрядом. // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т.27, вып. 3. – С. 45-48.
3. Абрамова Е. А. Математическое моделирование компонентного состава плазмы локализованного газового разряда. // Сб. статей “Твердотельная электроника и микроэлектроника” ВГТУ. – 2001. – С. 38-44.