

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ВЧ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ЭЛЕКТРОДЕ В СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВКАХ

В. Лисовский^{*,***}, Ж.-П. Бут^{*}, К. Ландри^{**}, Д. Дуэ^{**}, Г. Ренар^{**}, В. Касань^{**}

**Laboratoire de Physique et Technologie des Plasmas, Ecole Polytechnique
France*

***Unaxis Displays Division France SAS, 5,
France*

****Харьковский национальный университет
Украина*

Поступила в редакцию 05.04.2005

Нами предложен метод оценки величины ВЧ напряжения на потенциальном электроде в плазменной технологической установке, прямые измерения которого затруднены. Метод основан на измерении координат точки поворота на кривой зажигания ВЧ разряда и использовании известных значений дрейфовой скорости электронов в газе. Полученные с помощью нашего метода результаты близки к данным прямых измерений ВЧ напряжения на потенциальном электроде, а также позволяют получить разумные с физической точки зрения результаты (совпадение правых ветвей кривых зажигания ВЧ разряда для разных частот), согласующиеся с результатами других работ.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение получили технологические установки, в которых используется емкостный ВЧ разряд низкого давления. Эти установки могут быть применены для проведения таких процессов, как осаждение пленок на поверхность различных материалов (PECVD), травление полупроводниковых пластин, плазменная стерилизация медицинских инструментов и материалов и т.д. В этих установках часто используются плоские электроды, помещенные внутри заземленной камеры больших размеров. Измерить величину ВЧ напряжения непосредственно на потенциальном электроде в таких случаях сложно, т.к. к его поверхности обычно нет доступа, особенно в больших промышленных установках. Поэтому для оценки величины ВЧ напряжения используют разные модели эквивалентных цепей, описывающих данную технологическую камеру [1 – 4]. При этом делается ряд предположений о структуре данной эквивалентной цепи, о величине входящих в нее индуктивностей L , сопротивлений R и емкостей C элементов. Очевидно, что величина предсказанного таким спосо-

бом ВЧ напряжения на потенциальном электроде будет сильно зависеть от корректности сделанных предположений о структуре эквивалентной цепи и ее элементах. Поэтому реальная величина ВЧ напряжения может значительно отличаться от результатов таких оценок.

Авторы работ [5 – 8] предложили новый метод определения дрейфовой скорости электронов V_{dr} в газе с наложенным электрическим полем из положения точки поворота на кривой зажигания ВЧ емкостного разряда низкого давления. Этот метод позволяет определить величину V_{dr} в области высоких электрических полей, где измерения V_{dr} другими обычными методами становятся затруднительными. При этом определенные таким новым методом значения V_{dr} хорошо согласуются как с результатами прямых измерений дрейфовой скорости электронов, так и с результатами расчетов.

В настоящей работе мы предлагаем новый метод оценки величины ВЧ напряжения на потенциальном электроде, недоступном для прямых измерений. Этот метод основан на измерении кривой зажигания ВЧ емкостного

разряда низкого давления с использованием известных значений дрейфовой скорости электронов в газе. Полученные таким способом значения ВЧ напряжения согласуются с результатами прямых измерений, а также являются разумными с физической точки зрения.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В нашей исследовательской установке емкостный ВЧ разряд зажигался в диапазоне давлений газа $p \approx 0,01 - 30$ Торр при частотах ВЧ поля $f = 13,56$ МГц и $f = 27,12$ МГц. Для краткости изложения мы приведем только результаты, полученные для N_2 . Однако справедливость полученных данных подтверждена нами также для Ar , He , H_2 , NH_3 , O_2 , N_2O , SF_6 , NF_3 и ряда смесей этих газов в диапазоне зазоров между электродами $d = 5 - 27$ мм. Плоские круглые электроды из алюминия имели диаметр 143 мм. ВЧ напряжение с амплитудой $U_{rf} < 1300$ В от генератора через согласующее устройство прикладывалось к потенциальному электроду, а второй электрод был заземлен. Электроды находились внутри кварцевой трубки с внутренним диаметром 145 мм. Исследуемый газ напускался через маленькие отверстия в одном электроде и затем откачивался через зазор между вторым электродом и стенкой кварцевой трубки. Эта газоразрядная камера была полностью окружена заземленной сеткой и помещена внутри большей заземленной камеры диаметром

315 мм, а ее высота была равна 231 мм (см. рис. 1). Заземленная сетка, кварцевая трубка вокруг электродов и более низкое давление газа в большой камере препятствовали зажиганию в ней самостоятельного ВЧ разряда.

ВЧ напряжение подавалось на потенциальный электрод через коаксиальный кабель, находящийся внутри большой камеры и подключенный к разъему сквозного питания (feedthrough), вмонтированному в стенку большой заземленной камеры. К этому разъему мы далее подключали снаружи камеры ВЧ зонд или измеритель импеданса. ВЧ напряжение U_{rf} измерялось с помощью ВЧ зонда Z'SCAN (Advanced Energy). Этот ВЧ зонд находился на минимальном, возможном расстоянии от ВЧ электрода. Мы использовали ВЧ генератор RF5S (RF Power Products Inc.) и согласующее устройство PFM (Huttinger Elektronik GmbH) L-типа. Для определения импеданса Z и угла сдвига фазы ϕ нашей камеры мы использовали прибор Vector Impedance Meter 4193A (Hewlett Packard).

Давление газа измерялось с помощью Baratron 10 и Baratron 1000 (MKS Instruments). Напуск газа был равен $5 \text{ см}^3/\text{мин}$ и устанавливался с помощью контроллера газового потока. Контроллер давления поддерживал постоянную величину давления газа.

Мы применяли методику измерения кривых зажигания ВЧ разряда, предложенную Левитским [9]. Вблизи и справа от минимума кривой зажигания мы фиксировали давление газа и затем медленно увеличивали ВЧ напряжение до пробоя газа. В области слева от минимума ВЧ кривая зажигания может иметь область неоднозначной зависимости ВЧ напряжения зажигания от давления газа. Поэтому в этой области мы сначала уменьшали давление газа, устанавливали фиксированное значение ВЧ напряжения и затем медленно увеличивали давление газа до момента зажигания разряда. В момент зажигания разряда ВЧ напряжение скачком уменьшалось, а между электродами появлялось свечение, что служило критерием пробоя газа. Точность измерения ВЧ напряжения не превышала $1 - 2$ В

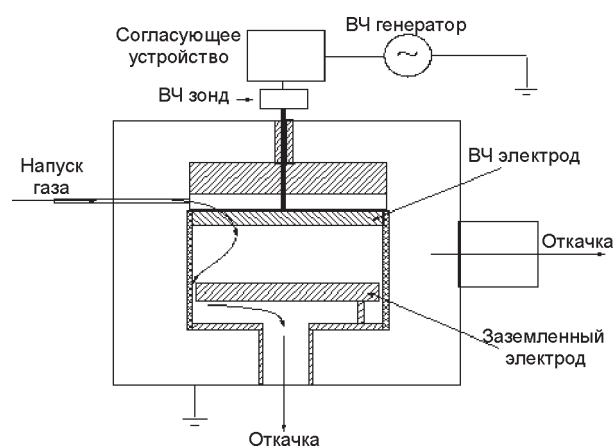


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

во всем исследуемом диапазоне U_{rf} . Скорость увеличения ВЧ напряжения перед пробоем не превышала 0,5 – 1 В/с, поэтому время задержки зажигания ВЧ разряда не влияло заметно на величины измеренных пробойных ВЧ напряжений.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

Для оценки величины ВЧ напряжения на потенциальном электроде используем следующую эквивалентную цепь, показанную на Рис. 2. Участок цепи, содержащий разъем и коаксиальный кабель, можно описать как индуктивность L и сопротивление R , а внутреннюю камеру без газоразрядной плазмы – как емкость C . Импеданс такой эквивалентной цепи $|Z|$ для частоты $\omega = 2\pi f$ равен

$$|Z|^2 = R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2. \quad (1)$$

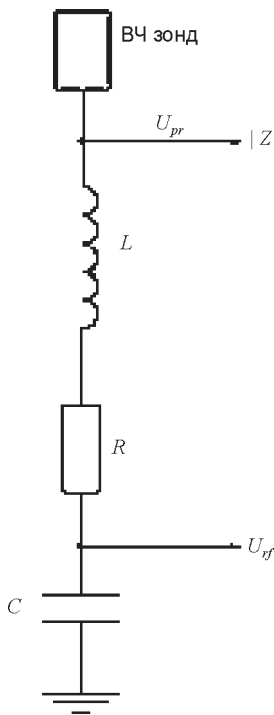


Рис.2. Эквивалентная схема нашей камеры.

Пусть мы знаем импеданс камеры для двух частот: исследуемой частоты $f = 27,12$ МГц (для которой нужно определить величину ВЧ напряжения на потенциальном электроде) и резонансной частоты f_{res} для данной геометрии разрядной камеры, $|Z|_{27}$ и $|Z|_{res}$, соответственно. Резонансная частота определяется при

угле сдвига фазы $\phi = 0$, тогда $|Z|_{res} = R$. Поэтому мы имеем

$$|Z|_{27}^2 = |Z|_{res}^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2. \quad (2)$$

Учтем, что

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

тогда можно легко получить, что

$$C = \frac{\left| \frac{f^2}{f_{res}^2} - 1 \right|}{2\pi f \sqrt{|Z|_{27}^2 - |Z|_{res}^2}}, \quad (4)$$

$$L = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{(2\pi)^2 f_{res}^2}, \quad (5)$$

$$V_{rf} = \frac{\sqrt{|Z|_{27}^2 - |Z|_{res}^2}}{\left| \frac{f^2}{f_{res}^2} - 1 \right|} \cdot V_{pr}. \quad (6)$$

Здесь V_{rf} – ВЧ напряжение на потенциальном электроде, V_{pr} – величина ВЧ напряжения, измеряемая ВЧ зондом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сформулируем нашу задачу более подробно. Итак, нам нужно оценить величину ВЧ напряжения на потенциальном электроде, расположенном внутри заземленной камеры большого размера. Для этого обычно нужно: 1) иметь возможность подключить ВЧ зонд непосредственно к потенциальному электроду (без промежуточных разъемов и соединительных кабелей), 2) иметь второй ВЧ зонд, чтобы одновременно измерять ВЧ напряжение как на потенциальном электроде, так и на разъеме (т.к. при переключении единственного ВЧ зонда с одной точки измерения в другую неизбежно изменится импеданс системы, поэтому измерения без второго ВЧ зонда смысла не имеют). Эти условия не являются легко выполнимыми, т.к. обычно доступа к потенциальному электроду нет, и вряд ли кто-то станет сверлить новые отверстия в дорогостоящей промышленной установке (в которой для оптимизации технологического процесса или решения возникшей проблемы

понадобилось оценить величину ВЧ напряжения на потенциальном электроде). И немногие компании и исследовательские центры могут позволить себе покупать дорогостоящее диагностическое оборудование с избытком.

При измерении ВЧ напряжения с помощью ВЧ зонда, подключенного к разъему, при частоте $f = 13,56$ МГц и ниже обычно проблем не возникает. Однако при переходе к более высоким частотам ВЧ зонд будет измерять ВЧ напряжение не корректно. Особенно заметная ошибка будет, если необходимая нам частота, скажем, $f = 27,12$ МГц, близка к собственной резонансной частоте нашей разрядной камеры f_{res} .

В созданной нами разрядной камере мы как раз и имеем такой случай. Рис. 3 показывает зависимости импеданса $|Z|$ и угла сдвига фазы ϕ для различных частот f , определенные с помощью измерителя импеданса Vector Impedance Meter. Из рисунка следует, что резонансная частота, при которой $\phi = 0$, равна $f_{res} = 33,14$ МГц. Если при $f = 13,56$ МГц угол $\phi \approx 90^\circ$ (что указывает на корректность измерений ВЧ напряжения при этой частоте с помощью ВЧ зонда, подключенного к разъему), то при $f = 27,12$ МГц мы имеем $|Z| = 17,7 \Omega$ и $\phi = 83,2^\circ$, а импеданс при резонансной частоте равен $|Z|_{res} = 2,2 \Omega$. Тогда из формулы (6) имеем

$$V_{rf} = 3,004 V_{pr}. \quad (7)$$

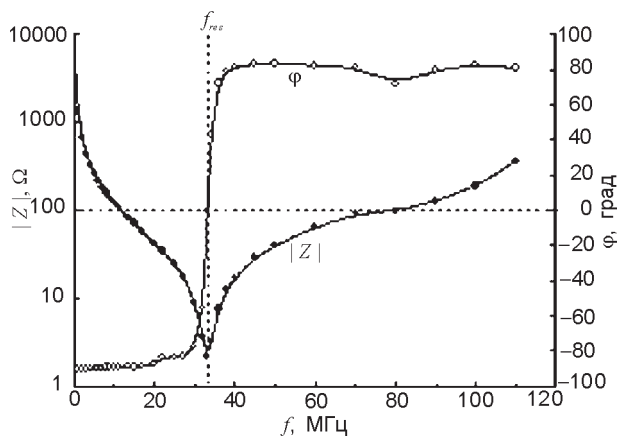


Рис. 3. Зависимости модуля импеданса $|Z|$ и угла сдвига фазы ϕ от частоты f .

Теперь рассмотрим методику измерения дрейфовой скорости электронов в электрическом поле и возможность ее применения для оценки величины ВЧ напряжения на потенциальном электроде. Чтобы определить дрейфовую скорость электронов в газе, мы использовали координаты точки поворота на измеренных кривых зажигания ВЧ емкостного разряда. Как известно [5 – 9], в диапазоне низких давлений слева от минимума ВЧ кривой зажигания наблюдается область неоднозначной зависимости ВЧ пробойного напряжения U_{rf} от давления газа p . На рис.4 показаны несколько ВЧ кривых зажигания для разряда в азоте. На этом же рисунке также показана такая особая точка как точка поворота (при давлении газа $p = p_t$ и ВЧ напряжении $U_{rf} = U_t$). При $p = p_t$ и $U_{rf} = U_p$, амплитуда смещения электронов равна половине расстояния между электродами, что приводит к повышенным потерям электронов на электродах [9]. Эта точка поворота обычно хорошо выражена, и процесс измерения ВЧ кривой зажигания особой трудности не представляет.

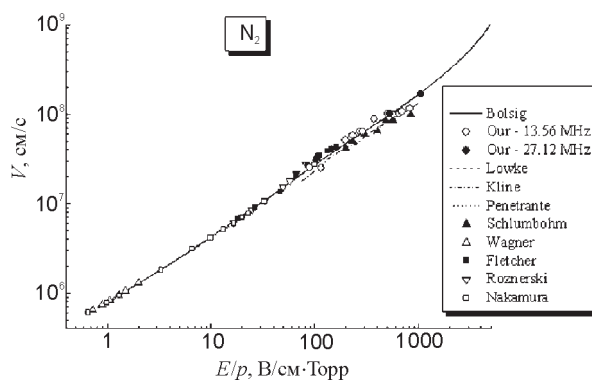


Рис. 4. ВЧ кривые зажигания в N_2 для различных расстояний между электродами.

Рассмотрим движение электронов в однородном ВЧ электрическом поле. Дрейфовая скорость электронов в ВЧ поле в случае $v_{en} \gg \omega$ (v_{en} – частота электрон-нейтральных столкновений) описывается формулой

$$V(t) = \frac{eE_{rf}}{mv_{en}} \cos(\omega t), \quad (8)$$

где e и m – электронные заряд и масса, соответственно, E_{rf} – амплитуда ВЧ электрического поля. Амплитуда дрейфовой скорости

$$V_{dr} = \frac{eE_{rf}}{m\nu_{en}} \quad (9)$$

является максимальной мгновенной скоростью электронов, соответствующей амплитудной величине ВЧ поля. Интегрируя (8) по времени, получим амплитуду A смещения электронов в ВЧ электрическом поле:

$$A = \frac{eE_{rf}}{m\nu_{en}\omega} = \frac{V_{dr}}{\omega} \quad (10)$$

В точке поворота ВЧ кривой зажигания с координатами $p = p_t$ и $U_{rf} = U_t$ амплитуда смещения электронов $A = d/2$, следовательно, для величины дрейфовой скорости мы имеем простую формулу:

$$V_{dr} = d\pi f \quad (11)$$

При фиксированной величине частоты ВЧ поля f и зазора между электродами d величина дрейфовой скорости электронов в точке поворота является постоянной, не зависящей от сорта газа. Измеренные координаты точки поворота позволяют нам определить отношение напряженности электрического поля и давления газа E/p , соответствующее этой величине дрейфовой скорости электронов. Например, пусть измеренные координаты точки поворота ВЧ кривой зажигания в азоте для зазора между электродами $d = 23$ мм равны $p_t = 0,096$ Торр и $U_t = 127$ В. Тогда $E/p = 57,9$ В/(см Торр) и $V_{dr} = 9,84 \cdot 10^7$ см/с. Таким образом, измеренная ВЧ кривая зажигания позволяет нам определить одну величину дрейфовой скорости электронов (если, конечно, ВЧ кривая зажигания имеет диффузионно-дрейфовую ветвь с хорошо выраженной точкой поворота). Чтобы определить ряд значений дрейфовой скорости электронов для разных E/p , нужно измерить семейство ВЧ кривых зажигания для разных зазоров между электродами и/или частот ВЧ электрического поля.

Величины дрейфовой скорости электронов, определенные нами из измеренных ВЧ

кривых зажигания для $f = 13,56$ МГц представлены на Рис. 5. На этом же рисунке показаны результаты моделирования [10 – 14] и непосредственных измерений дрейфовой скорости электронов [13 – 17]. Мы использовали также модель Bolsig code (Kinema Research and Software) с сечениями электрон-нейтральных столкновений для азота [18], чтобы иметь возможность сравнить результаты наших измерений с данными расчетов для N_2 в широком диапазоне значений E/p . На рис. 5 представлены величины дрейфовой скорости электронов в азоте, рассчитанные с помощью Bolsig code в диапазоне $E/p = 1 – 5000$ В/(см Торр). Из рисунка видно, что величины дрейфовой скорости, определенные нами из ВЧ кривых зажигания, хорошо согласуются с результатами расчетов, а также с результатами работ [10 – 17].

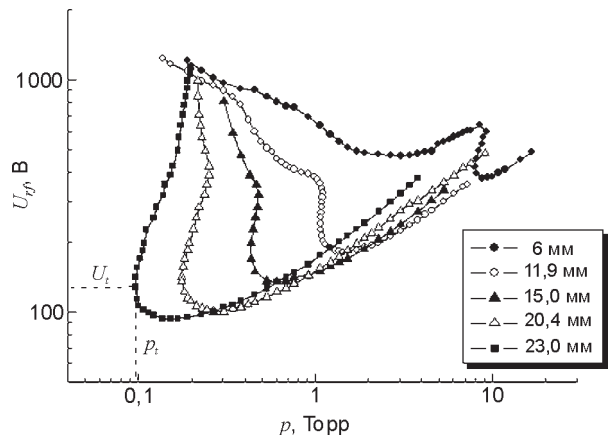


Рис. 5. Зависимость дрейфовой скорости электронов в азоте от E/p .

Однако этот же метод можно использовать как основу для нового метода оценки ВЧ напряжения на потенциальном электроде. Пусть мы имеем газоразрядную технологическую установку с внутренними плоскими электродами, расстояние между которыми равно d , и ВЧ генератор с частотой f , подключенный через согласующее устройство к этой установке. Напустим в камеру газ, для которого дрейфовая скорость электронов известна с хорошей точностью. Лучше использовать для этой цели азот. Для азота, во-первых, дрейфовая скорость электронов определена в широком диапазоне E/p (см. рис. 5) как экс-

периментально, так и теоретически. Во-вторых, область неоднозначной зависимости на ВЧ кривой зажигания в азоте выражена гораздо лучше, чем, например, для аргона, гелия и ряда других газов. В-третьих, азот – дешевый и доступный газ, что тоже важно. Измерим кривую зажигания ВЧ разряда $U_{pr}(p)$, используя небольшой напуск газа $Q = 1 - 5 \text{ см}^3/\text{мин}$. Так как мы проводим измерения с помощью ВЧ зонда, подключенного к разьему снаружи разрядной камеры, то реально мы имеем зависимость $U_{pr}(p)$. В области слева от минимума кривой зажигания мы получим точку поворота, для которой $dU_{pr}/dp = \infty$ с координатами $p = p_t$ и $U_{pr} = U_{t,pr}$. В этой точке дрейфовая скорость электронов согласно (11) может быть легко определена. Для этого нам нужно знать только величину зазора между электродами d и частоту нашего ВЧ генератора f (что заранее известно). Например, на рис. 6а показана ВЧ кривая зажигания для азота для $d = 1,19 \text{ см}$ и $f = 27,12 \text{ МГц}$. Для нее в точке поворота величина дрейфовой скорости электронов равна

$$V_{dr} = d \cdot \pi \cdot f = 1,19 \cdot \pi \cdot 27,12 \cdot 10^6 = 1,01 \cdot 10^8 \text{ см/с.}$$

Затем из рис. 5 определяем, что для того, чтобы электроны имели в азоте такую дрейфовую скорость, нам нужно иметь

$E/p \approx 530 \text{ В/(см Торр)}$. Координаты точки поворота для этой кривой зажигания равны $p_t = 0,25 \text{ Торр}$ и $U_{t,pr} = 113 \text{ В}$. Так как $E = U_{rf}/d$ (U_{rf} – амплитуда ВЧ напряжения на потенциальном электроде), то из известного значения E/p имеем:

$$\frac{E}{p_t} = \frac{U_{rf}}{p_t d} = 530 \text{ В/(см Торр)},$$

$$U_{rf} = 530 p_t d = 530 \cdot 0,25 \cdot 1,19 = 158,3 \text{ В.}$$

Тогда реальное ВЧ напряжение U_{rf} на нашем потенциальном электроде связано с ВЧ напряжением U_{pr} , измеренном с помощью ВЧ зонда снаружи разрядной камеры, соотношением

$$U_{rf} \approx 1,4 \cdot U_{pr}. \quad (12)$$

Рис. 6а показывает кривые зажигания ВЧ разряда для $d = 1,19 \text{ см}$ и $f = 27,12 \text{ МГц}$: измеренную с помощью ВЧ зонда $U_{pr}(p)$ и уточненные с помощью соотношений (7) (с коэффициентом пропорциональности $k \approx 3$) и (12) (для $k \approx 1,4$). На этом же рисунке показана кривая зажигания для $f = 13,56 \text{ МГц}$. Из рисунка видно, что в области более высоких давлений правые ветви кривых зажигания для $f = 13,56 \text{ МГц}$ и для $f = 27,12 \text{ МГц}$, полученной с помощью соотношения (12) с $k \approx 1,4$, совпадают. Этот результат хорошо согласуется с выводами работ [19, 20] о совпадении пра-

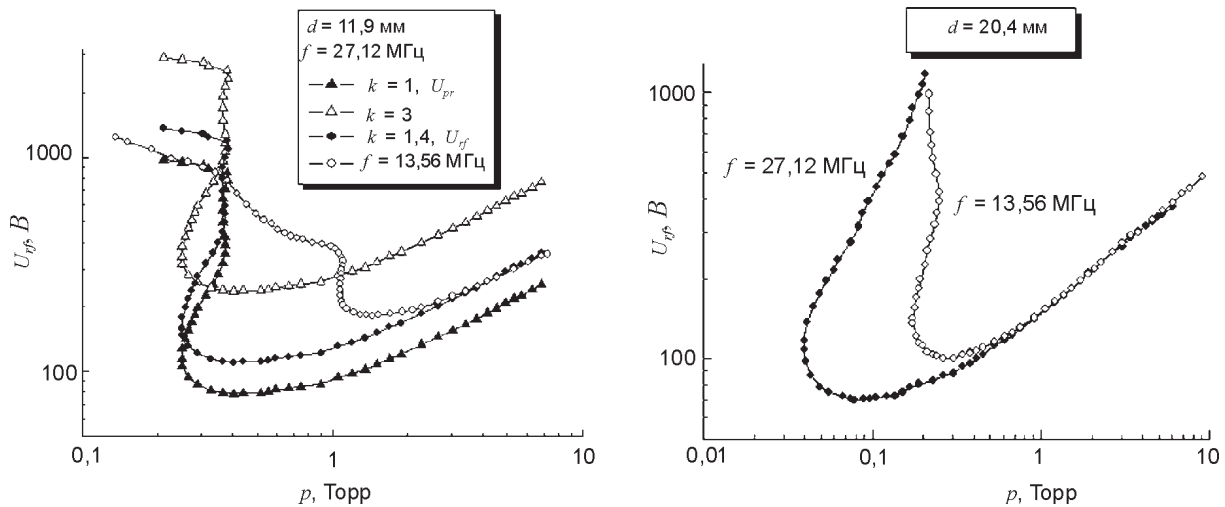


Рис. 6. а) ВЧ кривые зажигания в азоте для $d = 1,19 \text{ см}$ и $f = 27,12 \text{ МГц}$: измеренные с помощью ВЧ зонда $U_{pr}(p)$ ($k = 1$) и уточненные с помощью соотношений (7) ($k = 3$) и (12) ($k = 1,4$), а также ВЧ кривая зажигания для $f = 13,56 \text{ МГц}$; б) ВЧ кривые зажигания в азоте для $d = 2,04 \text{ см}$, $f = 27,12 \text{ МГц}$ и $f = 13,56 \text{ МГц}$.

вых ветвей кривых зажигания ВЧ разряда при разных частотах. Правые ветви ВЧ кривых зажигания, измеренных для $f = 27,12$ МГц и уточненных с помощью (12), совпали с правыми ветвями для $f = 13,56$ МГц и для других зазоров между электродами. Рис. 6б показывает кривые зажигания для $d = 2,04$ см. Применимость данного метода калибровки ВЧ напряжения подтверждена для нашей разрядной камеры во всем исследованном диапазоне зазоров d для всех исследованных нами газов, а не только для азота.

Чтобы использовать данный метод определения ВЧ напряжения, мы должны иметь точные значения давления газа между электродами (а не где-то, скажем, в вакуумной системе вдали от камеры). К тому же кривую зажигания в области точки поворота нужно измерить с хорошей точностью (желательно сделать это 2 – 3 раза с мелким шагом по давлению газа и ВЧ напряжению и затем усреднить полученные значения коэффициента пропорциональности k).

Мы провели также прямое измерение ВЧ напряжения на потенциальном электроде. Для этого мы установили второй ВЧ зонд сверху на заземленной части внутренней разрядной камеры, через специально сделанное отверстие подключили его непосредственно к потенциальному электроду, а кабель от ВЧ зонда вывели наружу из большой камеры через один из открытых портов для откачки газа (измерения были проведены при атмосферном давлении воздуха). В результате мы получили величину $k = U_{rf}/U_{pr} \approx 1,323$. Эта величина находится в гораздо лучшем согласии с величиной k , определенной с помощью нашего нового метода из кривой зажигания ВЧ разряда и известной дрейфовой скорости электронов, чем с выводом из эквивалентной схемы нашей камеры. Второй ВЧ зонд с заземленным корпусом, введенный внутрь камеры, с непосредственным подключением к потенциальному электроду (через отверстие в заземленной части внутренней камеры) совместно с кабелем для ВЧ зонда, несомненно, внесли возмущение в импеданс нашей системы. Поэтому такое «прямое» измерение ВЧ напряжения в данном случае само по себе

не является очень точным, но может быть использовано для оценки величины U_{rf} на потенциальном электроде. Наш же метод определения U_{rf} не вносит каких-либо искажений в импеданс разрядной камеры. К тому же полученные с помощью нашего метода значения ВЧ напряжения и измеренные непосредственно с помощью второго ВЧ зонда являются близкими. Это указывает на пригодность нашего метода для оценки ВЧ напряжения на потенциальном электроде, особенно если прямое измерение затруднено.

Теперь уточним, для каких геометрий разрядных (исследовательских и промышленных) камер можно применить наш метод для оценки ВЧ напряжения на потенциальном электроде. Так как метод основан на измерении кривой зажигания ВЧ разряда, то пробой газа должен происходить именно в зазоре между плоскими электродами. При этом пространство между электродами должно быть ограничено по периферии (радиальной границей электродов) диэлектрической стенкой либо хотя бы заземленной металлической сеткой. Между краем электродов и стенкой (сеткой) зазор должен быть минимально возможным (не более 1 мм), чтобы предотвратить зажигание ВЧ разряда в этом зазоре. В этом случае ВЧ кривая зажигания в области низких давлений газа будет иметь область неоднозначной зависимости пробойного ВЧ напряжения от давления газа с хорошо выраженной точкой поворота. Если плоские электроды введены внутрь большой заземленной камеры, а также в случае часто используемой установки GEC Reference Cell, при низких давлениях газа пробой происходит вне пространства между электродами, скажем, между поверхностью потенциального электрода и заземленной стенкой большой камеры. В этом случае ВЧ кривая зажигания не будет содержать точку поворота [21], поэтому наш метод оценки ВЧ напряжения на потенциальном электроде не пригоден.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в настоящей работе предложен метод оценки величины ВЧ напряжения на потенциальном электроде в плаз-

менной технологической установке, прямые измерения которого затруднены. Наш метод основан на измерении координат точки поворота на кривой зажигания ВЧ разряда и последующим использованием известных значений дрейфовой скорости электронов в газе. Метод не вносит искажений в импеданс разрядной камеры и прост в использовании. Данные, полученные с помощью нашего метода, хорошо согласуются с результатами прямых измерений ВЧ напряжения на потенциальном электроде. Откалибровав с помощью нашего метода ВЧ зонд, мы получили разумные с физической точки результаты (совпадение правых ветвей кривых зажигания для разных частот), согласующиеся с результатами измерений других авторов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы признательны компании Юнаксис (UNAXIS France – Displays division, Palaiseau, France) за финансовую поддержку исследований и за предоставленное оборудование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Van der Hoek W.G.M., de Vries C.A.M. and Heijmam M.G.J. Power loss mechanisms in radio frequency dry etching systems// *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 1987. – Vol. 5. – P. 647-651.
2. Andries B., Ravel G. and Peccoud L. Electrical characterization of radio-frequency parallel-plate capacitively coupled discharges// *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 1989. – Vol. 7. – P. 2774-2783.
3. Butterbaugh J.W., Baston L.D. and Sawin H.H. Measurement and analysis of radio frequency glow discharge electrical impedance and network power loss// *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 1990. – Vol. 8. – P. 916-923.
4. Roth W.C., Carlile R.N. and O'Hanlon J.F. Electrical characterization of a processing plasma chamber// *J. Vac. Sci. Technol. A.* – 1997. – Vol. 15. – P. 2930-2937.
5. Lisovskiy V.A. and Yegorenkov V.D. Electron Drift Velocity Determination in Air// *Record-Abstracts of IEEE Int. Conf. on Plasma Science (San Diego, USA).* – 1997. – P. 137.
6. Lisovskiy V.A. Determination of electron transport coefficients in argon from ignition curves of rf and combined low-pressure discharges// *Technical Physics Letters.* – 1998. – Vol. 24. – P. 308-310.
7. Lisovskiy V.A. and Yegorenkov V.D. Rf breakdown of low pressure gas and a novel method for electron drift velocity determination in gases // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1998. – Vol. 31. – P. 3349-3357.
8. Lisovskiy V.A. and Yegorenkov V.D. Electron-drift velocity determination in CF_4 and SF_6 in a strong electric field from breakdown curves of low-pressure RF discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 32. – P. 2645-2648.
9. Levitskii S.M. An investigation of the sparking potential of a RF discharge in a gas in the transition range of frequencies and pressures// *Sov. Phys. – Tech. Phys.* – 1957. – Vol. 2. – P. 887-893.
10. Lowke J.J. The drift velocity of electrons in hydrogen and nitrogen// *Aust. J. Phys.* – 1963. – Vol. 16. – P. 115-135.
11. Kline L.E. and Siambis J.G. Computer simulation of electrical breakdown in gases; avalanche and streamer formation. // *Phys. Rev. A.* – 1972. – Vol.5. – P. 794-805.
12. Penetrante B.M. and Bardsley J.N. A critique of Boltzmann solution methods for calculating the longitudinal diffusion coefficient of electron in gases // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1984. – Vol. 17. – P. 1971-1982.
13. Schlumbohm H. Stossionisierungskoeffizient alpha mittlere elektronenenergien und die beweglichkeit von elektronen in gase // *Z. Phys.* – 1965. – Vol. 184. – P. 492-505.
14. Wagner E.B., Davis F.J. and Hurst G.S. Time-of-flight investigations of electron transport in some atomic and molecular gases// *J. Chem. Phys.* – 1967. – Vol. 47. – P. 3138-3147.
15. Fletcher J. and Reid I.D. The transport parameters of an electron swarm in nitrogen at elevated E/N// *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1980. – Vol. 12. – P. 2275-2283.
16. [16] Roznerski W. and Leja K. Electron drift velocity in hydrogen, nitrogen, oxygen, carbon monoxide, carbon dioxide and air at moderate E/N// *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1984. – Vol. 17. – P. 279-285.
17. Nakamura Y. Drift velocity and longitudinal diffusion coefficient of electrons in nitrogen and carbon monoxide// *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1987. – Vol. 20. – P. 933-938.
18. Phelps A.V. and Pitchford L.C. Anisotropic scattering of electrons by N_2 and its effect on electron transport // *Phys. Rev. A.* – 1985. – Vol. 31. – P. 2932-2949.

19. [Githens S. The influence of discharge chamber structure upon the initiating mechanism of the high frequency discharge// Phys. Rev. – 1940. – Vol. 57. – P. 822-828.
20. Chenot M. Recherches experimentales sur la decharge en haute frequence// Ann. Phys. Paris. – 1948. – Vol. 3. – P. 277-375.
21. Lisovskiy V., Martins S., Landry K., Douai D., Booth J.-P., Cassagne V. and Yegorenkov V. Discharge chamber design effect on ignition and characteristics of low-pressure RF capacitive discharge// Physics of Plasmas. – 2005. – Vol. 12, № 9. – P. 093505 (1-8).

**ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ВЧ
НАПРУГИ НА ПОТЕНЦІЙНОМУ
ЕЛЕКТРОДІ В СКЛАДНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЗОРАЗРЯДНИХ
УСТАНОВКАХ**

**В. Лісовський, Ж.-П. Бут, К. Ландри,
Д. Дуге, Г. Ренар, В. Касань**

Нами запропонований метод оцінки величини ВЧ напруги на потенційному електроді в плазмовій технологічній установці, прямі виміри якого затруднені. Метод заснований на вимірі координат точок повороту на кривій запалювання ВЧ розряду і використанні відомих значень дрейфової швидкості електронів у газі. Отримані за допомогою нашого методу результати близькі до даних прямих вимірів ВЧ напруги на потенційному електроді, а також дозволяють одержати розумні з фізичної точки результати (збіг правих галузей кривих запалювання ВЧ розряду для різних частот), що погоджуються з результатами інших робіт.

**RF POTENTIAL DETERMINATION
AT THE DRIVEN ELECTRODE IN
COMPLEX TECHNOLOGICAL GAS
DISCHARGE SET-UP**

**V. Lisovskiy, J.-P. Booth, K. Landry, D.
Douai, G. Regnard, V. Cassagne**

We propose a technique for evaluating the RF potential at the driven electrode in a technological gas-discharge device where the direct measurements are impeded. The technique is based on registering the coordinates of the turning point at the RF discharge breakdown curve and using the well-known values of the electron drift velocity in a gas. The results we obtained with our technique are close to the data of direct measuring of the RF potential at the driven electrode, and they also permit to get the results reasonable from the physical point of view (coincidence of right-hand branches of RF discharge breakdown curves for different frequencies), in agreement with the results of other papers.