

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Пытьев Ю. П. Матем. сб., 1983, 120, № 2, с. 240. [2] Пытьев Ю. П. Матем. сб., 1982, 148, № 1, с. 19.

Поступила в редакцию
17.08.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 4

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОБСТВЕННЫХ ПОСТОЯННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЧ-РАЗРЯДА ОТ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

А. А. Кузовников, В. Л. Ковалевский, В. П. Савинов

(кафедра электроники)

Факт присутствия собственного постоянного электрического поля в ВЧ-разряде низкого давления давно установлен экспериментально [1—3]. Механизм возникновения напряжения V_0 постоянного электрического поля при контакте с плазмой электрода, находящегося под ВЧ-потенциалом (ВЧ-детектирование), убедительно объяснен нелинейным характером проводимости приэлектродного слоя пространственного заряда и экспериментально подтвержден в работе [4]. Как показано в работах [5, 6], присутствие собственных постоянных электрических полей в ВЧ-разряде приводит к возникновению пучков быстрых электронов, играющих важную роль в механизме этого разряда и обуславливающих сильную неравновесность плазмы ВЧ-разряда. Вместе с тем зависимость V_0 от основных параметров ВЧ-разряда до сих пор не изучена.

Актуальность подобных исследований очевидна, если учесть, что ВЧ-детектирование — это явление, происходящее в самых различных физических условиях, когда имеется контакт плазмы с ограничивающими ее поверхностями, находящимися под ВЧ-потенциалом (зонды в ВЧ-плазме, разрядные электроды в ВЧ-разряде, элементы установок для удержания плазмы, антенны радиопередатчиков в ионосфере и т. д.).

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению зависимости величины напряжения постоянного электрического поля V_0 от основных параметров ВЧ-разряда — амплитуды ВЧ-напряжения V_{\sim} , частоты ВЧ-поля f , давления p и рода рабочего газа, а также от материала электродов. Особый интерес представляло изучение зависимости V_0 от эмиссионной способности электродов, определяемой сочетанием «род рабочего газа — материал электродов».

Исследовался стационарный симметричный емкостный ВЧ-разряд в гелии и неоне в области давлений 10—1300 Па и диапазоне частот 0,5—12 МГц, т. е. в условиях, когда $f/\nu \ll 1$, где ν — частота столкновений электронов с атомами. Эффективные значения ВЧ-напряжения изменялись в пределах 100—1000 В. ВЧ-разряд создавался в стеклянных цилиндрических разрядных трубках с плоскими внутренними электродами из титана и молибдена, наиболее часто встречающихся в вакуумной и электронной технике. Диаметр разрядных трубок составлял 50—80 мм.

Измерения V_0 производились с помощью электрической цепи с однократным цилиндрическим лентмюровским зондом (рис. 1). При этом измерялась разность потенциалов постоянного электрического поля между электродом разрядной трубки и зондом, находящимся в точке

с наибольшим относительно электрода потенциалом. Измерительные зонды (в количестве 4—5) впаивались в стенки разрядных трубок в приэлектродной области на расстоянии 10 мм от электрода с интервалом 10 мм. Рабочая часть зондов располагалась в окрестности оси разрядной трубки, причем для уменьшения возмущающего действия места ввода последовательных зондов были сдвинуты на 90°. Разрядный электрод плавно перемещался относительно зондов с помощью микрометрического винта.

Длина рабочей части каждого зонда составляла 4 мм, диаметр — 0,1 мм. Два ближайших к электроду зонда были снабжены защитной стеклянной рубашкой для предотвращения изменения площади их рабочей поверхности вследствие распыления материала электродов.

Для корректного измерения V_0 ис-

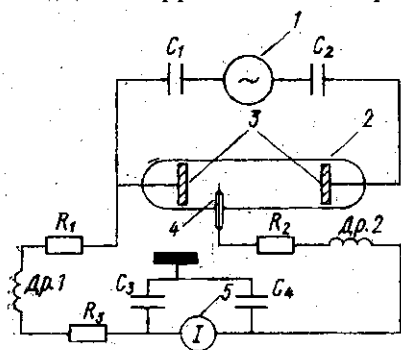


Рис. 1. Экспериментальная схема для измерения постоянного напряжения детектирования V_0 : 1 — ВЧ-генератор, 2 — разрядная трубка, 3 — разрядный электрод, 4 — электрический зонд, 5 — I — микроамперметр типа М-193; $R_1=5$ МОм, $R_2=750$ кОм, $R_3=305$ МОм; $C_1=C_2=0,015$ мкФ; $C_3=C_4=3300$ пФ; Др. 1, 2 — дроссели с индуктивностью $L_1=L_2=12$ мГ

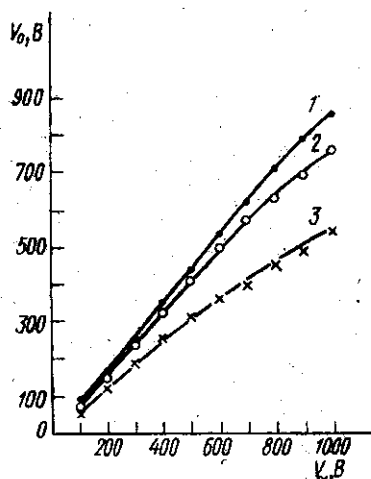


Рис. 2. Зависимость V_0 от амплитуды ВЧ-напряжения V_m . Газ — Ne, электрод — Ti, частота ВЧ-поля $f=6$ МГц; $p=40$ (1); 66,7 (2) и 146,6 (3) Па

пользованная электрическая цепь должна удовлетворить двум условиям: 1) сопротивление измерительной цепи должно быть существенно больше сопротивления участка разрядного промежутка, падение потенциала на котором измеряется; 2) сопротивление измерительной цепи на частоте ВЧ-поля должно быть существенно больше сопротивления слоя пространственного заряда около зонда.

Как известно, выполнение второго условия необходимо для устранения детектирования ВЧ-поля в слое около зонда, приводящего к занижению измеряемой величины V_0 на величину этого выпрямленного напряжения. Величина же последнего пропорциональна падению ВЧ-напряжения в призондовом слое. Сопротивления слоя около зонда и измерительной цепи образуют делитель для ВЧ-составляющей напряжения. Таким образом, при выполнении второго условия падение ВЧ-напряжения в слое около зонда пренебрежимо мало и мала ошибка измерения V_0 за счет ВЧ-наводок в измерительной цепи.

Выбор параметров измерительной цепи (см. рис. 1) обусловлен приведенными соображениями. В качестве $R_1—R_3$ использовались резисторы типа МЛТ-0,125, имеющие малую собственную емкость порядка 0,01 пФ.

Использованный для измерения V_0 калиброванный микроамперметр не содержит нелинейных элементов, будучи простейшей системой в виде рамки с малым сопротивлением. В связи с этим ВЧ-наводки на измерительном приборе малы и практически не влияют на его показания. Все элементы измерительной системы тщательно экранировались.

Экспериментальные результаты.

Зависимость величины V_0 от эффективного значения ВЧ-напряжения V_{\sim} представлена на рис. 2. Кривые рис. 3 иллюстрируют зависимость V_0 от давления газа; видно монотонное уменьшение V_0 с ростом p . Обнаружена зависимость V_0 от материала электрода при прочих неизменных условиях (рис. 4,а). Установлен факт зависимости V_0 от рода газа при прочих фиксированных условиях в разряде (рис. 4,б). В исследованном диапазоне частот (1,5—12 МГц) установлена зависимость V_0 от частоты ВЧ-поля (рис. 5).

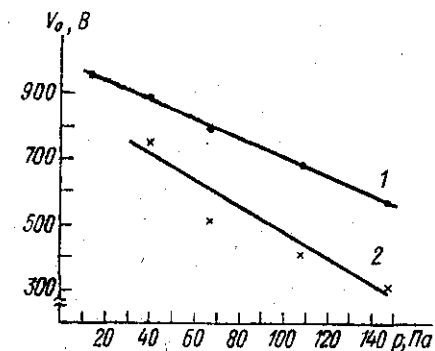


Рис. 3. Зависимость V_0 от давления газа. Газ — Ne, электрод — Ti, $V_{\sim}=1000$ В, $f=6$ (1) и 1,5 (2) МГц

Следует отметить, что в зависимости от изменения параметров ВЧ-разряда V_0 может изменяться очень существенно.

Обсуждение экспериментальных результатов. В настоящей работе получены значения V_0 для исследованных условий (см. рис. 2, 3), которые подтверждают установленный в работе [3] характер зависимости V_0 от V_{\sim} и p .

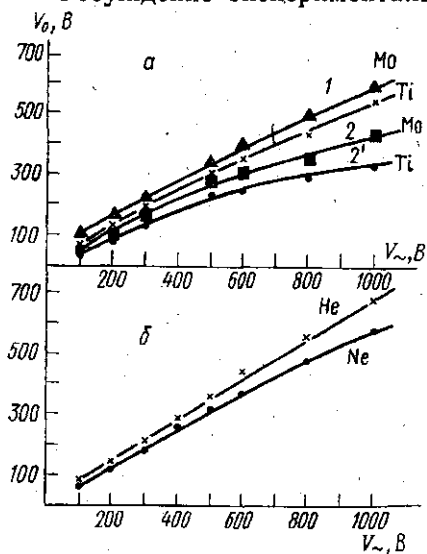


Рис. 4. Зависимость V_0 от материала электрода. Газ — Ne, $p=146,6$ Па; 1, 1' — $f=6$ МГц; 2, 2' — $f=1,5$ МГц (а). Зависимость V_0 от рода газа: электрод — Mo, $p=146,6$ Па; $f=8$ МГц (б)

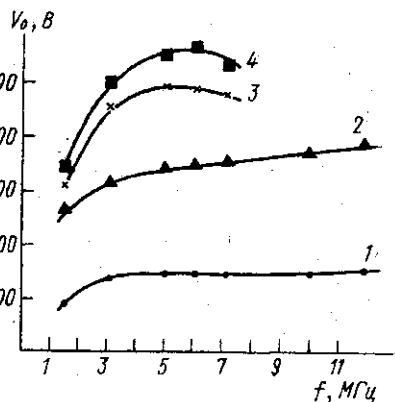


Рис. 5. Зависимость V_0 от частоты ВЧ-поля. Газ — Ne, $p=146,6$ Па; электрод — Ti, $V_{\sim}=200$ (1), 600 (2), 900 (3) и 1000 (4) В

Величина V_0 монотонно растет с увеличением V_{\sim} и уменьшается с ростом давления в соответствии с механизмом явления ВЧ-детектирования [4]. Обнаруженная зависимость V_0 от материала электрода и рода газа позволяет получить более детальное представление о меха-

низме ВЧ-детектирования, исходя из которого эту зависимость естественно объяснить различной интенсивностью электронной эмиссии с поверхности электрода для различных сочетаний «материал электрода — рабочий газ». Работа выхода материала эмиттера ϕ определяет интенсивность всех видов эмиссии. По данным работы [7], для Мо и Ti имеем: $\phi_{Mo} = 4,09$ эВ, $\phi_{Ti} = 3,72$ эВ. Приведенные на рис. 4,а результаты показывают, что при прочих фиксированных условиях в разряде значения V_0 для молибденовых электродов выше, чем для титановых, что соответствует соотношению ϕ_{Mo} и ϕ_{Ti} .

Наблюдаемая зависимость V_0 от рода газа (см. рис. 4,б) обусловлена тем, что обобщенный коэффициент эмиссии электронов γ с поверхности электрода определяется воздействием на электрод ионов, фотонов, возбужденных атомов и быстрых атомов, возникающих в процессе перезарядки. Естественно, что перечисленные факторы воздействия газоразрядной плазмы на электрод будут различными для разных газов.

Влияние рода газа на характеристики тлеющего разряда постоянного тока, связанные с эмиссионными процессами, в частности на величину нормального катодного падения $V_{кн}$, исследовалось в работе [7]. Так, например, для молибденового катода установлено, что $V_{кн}$ при фиксированных параметрах разряда монотонно уменьшается для следующей последовательности газов: He, Ne, Ar. Как видно из рис. 4,б, значения V_0 для пары He—Mo выше, чем для сочетания Ne—Mo, что качественно соответствует упомянутому ходу зависимости $V_{кн}$ от рода газа.

Представляет интерес обнаруженная зависимость V_0 от частоты ВЧ-поля f . Из кривых рис. 5 видно, что для заданных условий в разрядной трубке при изменении V_{\sim} отмечается зависимость $V_0(f)$ трех типов: а) насыщение зависимости $V_0(f)$ с увеличением f , начиная с некоторой частоты f_n , в случае относительно малых напряжений $V_{\sim} \ll \ll 200$ В; б) монотонное увеличение V_0 с ростом частоты для диапазона напряжений 200 В $\ll V_{\sim} \ll 800$ В; в) немонотонный ход зависимости $V_0(f)$ при $V_{\sim} > 800$ В. Диапазон напряжений V_{\sim} , соответствующий каждому из случаев а—в, зависит от начальных физических условий в разрядной трубке.

Отмеченное в случае а наличие граничной частоты f_n является характерным свойством зависимости $V_0(f)$. Это обусловлено проявлением инерционных свойств ионов в исследованном диапазоне частот ВЧ-поля. Анализируя движение ионов в окрестности электрода на расстояниях порядка длины их свободного пробега, легко получить выражение для частоты f_n : $f_n^2 = eEP_i p / (8M)$, где E — напряженность поля в окрестности электрода; P_i — сечение процесса перезарядки; p — давление газа; M — масса иона; e — заряд электрона.

Отсутствие эффекта насыщения зависимости $V_0(f)$ в случаях б и в можно объяснить следующим образом. Оценки показывают, что при $V_{\sim} \geq 500$ В частота $f_n > 12$ МГц, т. е. значение f_n выходит за пределы использованного диапазона частот. Немонотонный характер зависимости $V_0(f)$ в случае в при уменьшении V_0 можно объяснить существенным возрастанием эмиссионных процессов в области повышенных частот ВЧ-поля. Последнее следует ожидать в связи с хорошо известным фактом быстрого увеличения концентрации электронов в плазме ВЧ-разряда при росте частоты ВЧ-поля, что должно сопровождаться интенсификацией процессов воздействия на эмиттирующие электроды.

Приведенные результаты показывают, что значение напряжения V_0 существенно зависит от всех основных параметров ВЧ-разряда. Соглас-

но работе [6], параметры плазмы ВЧ-разряда зависят от напряжения V_0 , поэтому возможность контролируемого изменения этой величины в широких пределах представляет интерес. Вышеизложенное, в частности, показывает, что возможности для управления параметрами плазмы ВЧ-разряда более разнообразны, чем в случае разряда постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Vanerji D., Ganguli R. Phil. Mag., 1932, 13, N 84, p. 494. [2] Джерпетов Х. А., Патеев Г. М. ЖЭТФ, 1955, 28, № 3, с. 343. [3] Левитский С. М. ЖТФ, 1957, 27, № 5, с. 1001. [4] Butler H., Kino G. Phys. Fluids, 1963, 6, N 9, p. 1346. [5] Кузовников А. А., Савинов В. П. В кн.: Вопросы физики низкотемпературной плазмы. Минск, 1970, с. 162. [6] Кузовников А. А., Савинов В. П. Радиотехн. и электроника, 1973, 18, № 4, с. 816. [7] Чистяков П. Н. Зависимость нормальных катодных падений потенциала $V_{кн}$ в инертных газах от различных факторов. Физическая электроника, вып. 3. М.: Атомиздат, 1966, с. 3—19.

Поступила в редакцию
23.08.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 4

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ФОТОВОЗБУЖДЕННЫХ АДСОРБИРОВАННЫХ МОЛЕКУЛ НА ПЕРЕЗАРЯДКУ ПАРАМАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК В СТРУКТУРЕ ДИЭЛЕКТРИК—ПОЛУПРОВОДНИК

С. В. Винценц, С. Н. Карягин, Г. С. Плотников

(кафедра общей физики для химического факультета)

Ранее обнаружено [1], что при освещении структур полупроводник — окисел — органический краситель (эритрозин) в полосе поглощения красителя происходит перезарядка глубоких ловушек окисного слоя, ответственных за отрицательное заряджение. Перезарядка связана с передачей энергии электронного возбуждения от адсорбированных молекул к электронам, локализованным в окисле. Однако в окисле существуют и ловушки для дырок. Это — кислородные вакансии (E_1 - и E_2 -центры), фотозаряжение которых происходит при облучении более жесткими квантами [2, 3]. При измерении суммарного заряджения окисла разделить процессы перезарядки ловушек для электронов и дырок невозможно.

Для получения информации о переходе E_1 - и E_2 -центров из непарамагнитного в парамагнитное состояние при фотозабуждении молекул красителя в настоящей работе наряду с методом фотозаряжения использован метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Исследовались структуры германий — двуокись германия — адсорбированный краситель (кумарин). Для электрофизических измерений использовались монокристаллические образцы высокоомного германия n -типа ($\rho \sim 30$ Ом·см) с толщиной окисного слоя d 5 и 20 нм. Для увеличения отношения сигнал/шум спектры ЭПР снимались на окисленных микрокристаллах германия. Методика измерения оптического заряджения ловушек диэлектрика и спектров ЭПР была та же, что в работах [1, 2]. Поверхностная концентрация кумарина измерялась по методу кварцевых весов [4] и составляла $\sim 2 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$.

Спектры оптического заряджения исследуемых структур представлены на рис. 1. Рассмотрим в первую очередь спектры фотозаряжения