

04

© 1990 г.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ЦЕЗИЕВОМ ДИОДЕ В ПРЕДПОДЖИГОВОМ РЕЖИМЕ

А. М. Брюзгин, Ю. Г. Чередниченко

Приведены результаты измерения распределения потенциала в зазоре эмиттирующим зондом в предподжиговом режиме в парах цезия при $l_e, i \ll d$. Показана трансформация распределения потенциала в межэлектродном зазоре в различных точках вольт-амперных характеристик диода. Обнаружены волнообразные зависимости потенциала зонда от напряжения на аноде.

Исследования развития пробоя в диоде с эмиттирующими электродами постоянно стимулируются разработкой различного вида технических устройств. При низких давлениях, когда длина свободного пробега электронов и ионов (l_e, i) сравнима или больше межэлектродного зазора $d \ll l_e, i$, процессы развития разряда исследованы в работах [1-3], а при $d > l_e, i$ в [4, 5].

В данной работе изложены результаты исследований распределения потенциала в диоде с эмиттирующими электродами в парах цезия в предподжиговом режиме с помощью измерения «плавающего» потенциала эмиттирующего зонда при давлении $P=24-240$ Па и температуре электродов $T=500-800$ °С.

Экспериментальный прибор — плоскопараллельный диод с электродами из нержавеющей стали Х18Н10Т диаметром 21 мм и межэлектродным зазором 10 мм. Зонд изготовлен из молибденовой проволоки диаметром 0.1 мм в виде кольца диаметром 10 мм, которое располагалось в межэлектродном зазоре (МЭЗ) параллельно плоскости электродов и имеет двойную изоляцию от корпуса разрядной камеры с сопротивлениями $R_1=20-150$ кОм и $R_2=100-250$ кОм, которые определялись давлением паров цезия. Параллельно R_2 подключено образцовое сопротивление $R_0=20-100$ кОм. К средней точке изоляции подключен выход усилителя тока (УТ), автоматически компенсирующий токи утечки по R_1 на корпус разрядной камеры и поддерживающий разность потенциалов на параллельно включенных сопротивлениях R_2 и R_0 между средней точкой изоляции и зондом на уровне $\Delta U \ll 1.0$ мВ при изменении напряжения на зонде в пределах $0-\pm 100$ В. В эксперименте ток зонда $I = \Delta U (R_0 R_2 / (R_2 + R_0))^{-1}$ не превышал $5 \cdot 10^{-8}$ А, что соответствует плотности тока зонда $j_s \ll 5 \cdot 10^{-7}$ А/см². При $P \geq 24$ Па оценки с учетом C_s^* равновесной плотности хаотического тока электронов дают $j_{ex} \geq 1.5 \cdot 10^{-7}$ А/см² для $T = 500$ °С и $j_{ex} \geq 2 \cdot 10^{-6}$ А/см² для 600 °С.

Как показал расчет из баланса тепла между электродами, зондом и держателем зонда, в эксперименте температура зонда T_s была ниже температуры электродов не более чем на 40° для $T=500$ °С и 150° для $T=800$ °С. Это обеспечивало даже при работе выхода поверхности зонда $W_s = 1.8$ эВ, равной работе выхода цезия, ток эмиссии с зонда $j_R > j_{ex}$ ($j_R = 5 \cdot 10^{-5}$ А/см² для $T=500$ °С и $j_R = 2 \cdot 10^{-2}$ А/см² для 800 °С). Реально $W_s < 1.8$ эВ, так как $1.3 < T_s/T_{Cs} < 1.8$ [6]. Следовательно, во всем диапазоне изменения давления цезия и $T \geq 600$ °С $j_s < j_{ex}$, $j_s < j_R$ и зонд находится под «плавающим» потенциалом. Согласно простейшей теории [7, 8], разность между «плавающим» потенциалом эмиттирующего зонда и пространством лежит в пределах

$$-\frac{kT_e}{e} \ln\left(\frac{M}{m}\right)^{1/2} < \varphi_{\text{эл}} < \frac{kT_s}{e} \ln\left(\frac{j_R}{j_{ex}}\right), \quad (1)$$

где T_e и T_s — температуры соответственно электронов и зонда; M, m — массы ионов и электронов.

Учет рассеивания частиц в призондовом слое не влияет существенно на $\varphi_{\text{эл}}$ [°]. Для $T_e \ll 0.25$ эВ оценки показывают, что в условиях эксперимента $|\varphi_{\text{эл}}| \ll 1.5$ В, а в отсутствие объемной ионизации $0 < \varphi_{\text{эл}} < 1$ В и слабо ме-

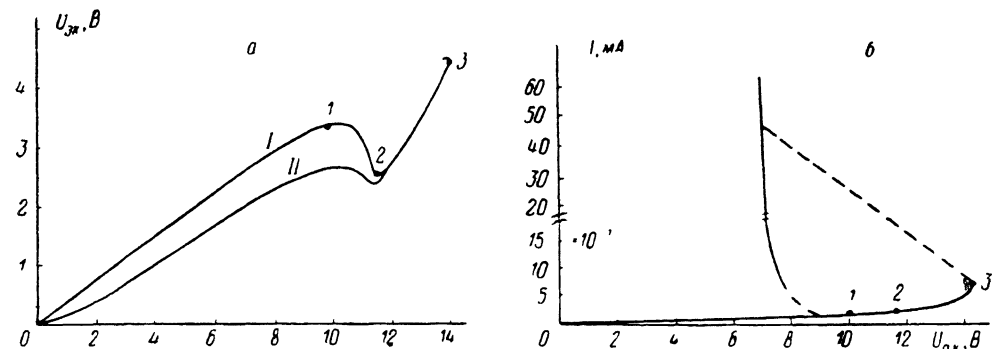


Рис. 1. Экспериментальные зависимости для $T=600$ °С и $P=54$ Па, $X=5$ мм.

a — зависимость потенциала зонда от напряжения на аноде, *b* — вольт-амперная характеристика диода.

няется вдоль вольт-амперной характеристики диода, следовательно, при потенциале зонда $U_{\text{эл}} \gg |\varphi_{\text{эл}}|$ напряжение на выходе УТ близко к потенциалу пространства.

В эксперименте регистрировался «плавающий» потенциал зонда в различных точках межэлектродного зазора. В процессе измерения «плавающего» потен-

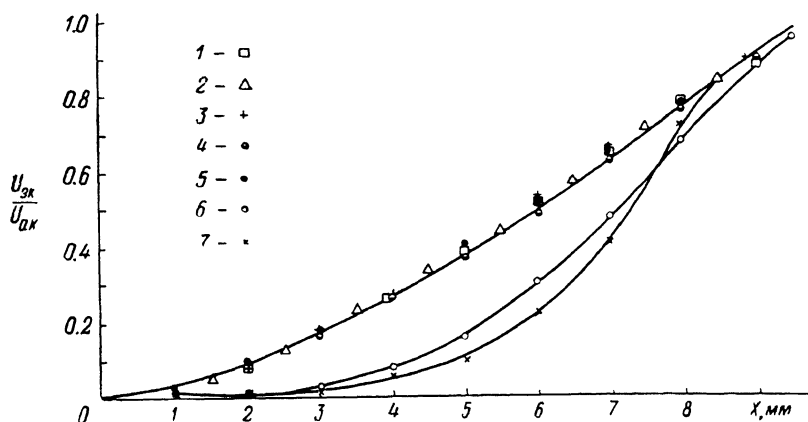


Рис. 2. Зависимость $U_{\text{эл}}/U_{\text{ан}}$ от расстояния зонд—катод.

$T, \text{C}: 1-500; 2-4-600; 5-700; 6, 7-800; P, \text{Па}: 1, 3, 5-7-46; 2-24; 4-240; U_{\text{эл}}, \text{В}: 1, 3, 5, 7-6; 2-5; 4-35; 6-3; U_{\text{пр}}, \text{В}: 1-19.5; 2-9.6; 3-11.5; 4-47.5; 5-9.5; 6, 7-7.5.$

циала снимались вольт-вольтовые характеристики (ВВХ) зонда — зависимость разности потенциалов между зондом и катодом $U_{\text{эл}}$ от напряжения на аноде $U_{\text{ан}}$. Одновременно регистрировались вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода.

Характерный вид экспериментальных зависимостей представлен на рис. 1 (*a* — ВВХ зонда, *b* — ВАХ диода). Точками 1—3 отмечены границы 0—1 разряда без анодной пленки, 1—2 — разряда с анодной пленкой, 2—3 — разряда, где наряду с анодной пленкой в зазоре у анода возникает слабое свечение, граница которого перемещается к катоду с ростом тока. Из рис. 1, *a* (кривая I с УТ в цепи зонда, кривая II — без УТ) следует, что влияние тока утечек по изоляции зонда на ВВХ существенно на участке 0—2 ВАХ диода. Для этого режима влияние зонда на ВАХ диода мало. С ростом P и снижением T влияние

утечек по изоляции зонда на ВАХ усиливаются. При этих режимах зонд без УТ заметно искажает ВАХ диода и напряжение пробоя $U_{пр}$ сильно зависит от места положения зонда в зазоре (кривые 2, 5 на рис. 4). При наличии УТ влияние зонда на ВАХ диода с изменением расстояния зонд—катод в пределах 0.5—9.5 мм в исследованных режимах не обнаружено. В дальнейшем все приведенные результаты получены с УТ в цепи зонда.

На рис. 2 приведены для участка ВАХ 0—1 распределения безразмерного потенциала зонда ($U_{зк}/U_{ак}$) от расстояния зонд—катод (X) при различных T , P и $U_{ак}$. Их анализ показывает, что при $T \leq 700$ °С экспериментальные результаты 1—5 описываются зависимостью

$$\frac{U_{зк}}{U_{ак}} \approx \left(\frac{X}{d_0}\right)^{3/2}, \quad (2)$$

где d_0 — эффективный зазор ($d_0 = 9.6$ мм $< d$).

Такое распределение соответствует прохождению частиц через газонаполненный диод при их постоянной подвижности для случая $l_{ei} \ll d$ [8].

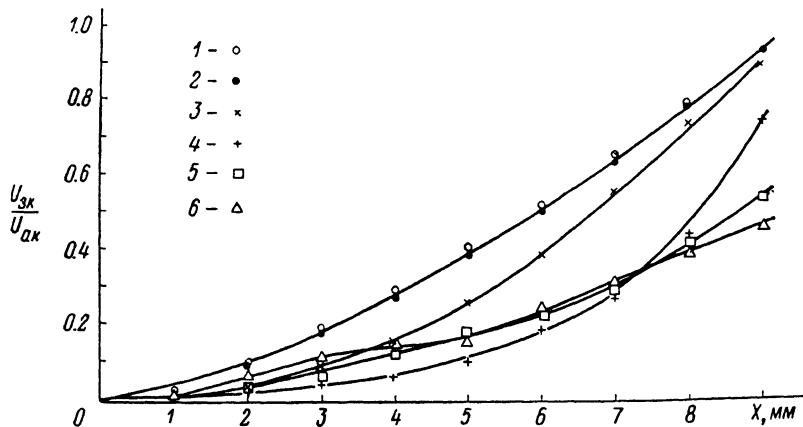


Рис. 3. Зависимость $U_{зк}/U_{ак}$ от X при развитии разряда.

$T = 650$ °С; P , Па: 1, 4—6 — 24; 2, 3 — 130; $U_{пр}$, В: 1, 4—6 — 7.6; 2, 3 — 21.3; $U_{ак}$, В: 1 — 3.5; 2 — 15; 3 — 21.5; 4 — 5; 5 — 6; 6 — 7.25; 7 — расчет по (2).

Для $T \leq 600$ °С равновесная концентрация электронов $n_{e0} \leq 7 \cdot 10^6$ см $^{-3}$ и радиус Дебая $r_d \geq 2-3$ мм. В отсутствие объемной ионизации при $U_{ак} \gg (kT_e)/e$ в зазоре заведомо отсутствует квазинейтральная плазма. Поэтому хорошее согласие экспериментальных результатов 1—4 с зависимостью (2) может служить подтверждением правильности методики измерения потенциала в зазоре по «плавающему» потенциалу эмиттирующего зонда на участке 0—1 ВАХ диода.

При $T = 800$ °С для этого участка ВАХ (кривые 6, 7) наблюдается провисание распределения потенциала $U_{зк}$ относительно зависимости (2) и у катода имеется область слабого поля, указывающая на наличие квазинейтральной плазмы.

На рис. 3 приведено распределение потенциала зонда в МЭЗ для различных участков ВАХ и расчетная зависимость 7 по (2). Кривые 1 и 2 относятся к участку 0—1 ВАХ без «анодной пленки». Кривые 3 и 4 построены для участка 1—2 ВАХ, когда формирование «анодной пленки» закончено. Кривые 5, 6 для участка 2—3 ВАХ, когда наряду с «анодной пленкой» в зазоре образуется слабое свечение. Из рисунка видно, что с увеличением $U_{ак}$ и началом формирования «анодной пленки» в зазоре появляется «провисание» распределения потенциала относительно зависимости (2). Максимальное «провисание» наблюдается в точке 2 ВАХ. По аналогии с кривой 6 на рис. 2 можно сказать, что у катода образуется область квазинейтральной плазмы. С дальнейшим ростом $U_{ак}$ (участок 2—3 ВАХ) в центральной части зазора (кривые 5, 6) происходит подъем потенциала. Вблизи же анода потенциал практически остается неизменным, а относительный ($U_{зк}/U_{ак}$) уменьшается. В точке зазора, где находится фронт слабого объемного свечения, в распределении потенциала наблюдается излом

(для кривой 5 при $X=7$ мм, для 6 при $X=4$ мм). Для $P \geq 130$ Па особенно при снижении T получить ясную картину трансформации потенциала на участке 1—3 ВАХ в МЭЗ не удалось, так как этот участок уменьшается и вырождается в точку. Следует отметить, что при $T=500$ °С и $P=240$ Па (рис. 4) на участке 0—1 ВАХ наблюдается отклонение от зависимости (2).

В отдельных режимах были получены волнообразные зависимости $U_{\text{зк}}$ от $U_{\text{ак}}$ (рис. 4). Этот эффект, как правило, наблюдается на участке ВАХ, предшествующем зажиганию «анодной пленки», и наиболее ярко проявляется при $T \leq 600$ °С и высоких давлениях цезия. По мере движения зонда к аноду колебания потенциала затухают. Разность потенциалов между соседними гребнями волн составляет 1.4—1.5 В, т. е. близка к потенциалу возбуждения цезия. Вероятней всего, этот эффект связан с эстафетным характером формирования функции распределения электронов в зазоре при

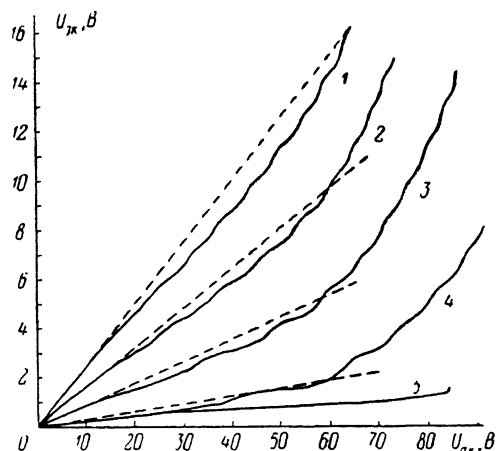


Рис. 4. Зависимость потенциала зонда от напряжения на аноде для $T=500$ °С, $P=240$ Па. $U_{\text{пр}}=100$ В.

X, мм: 1 — 4; 2 — 3; 3 — 2; 4 — 1; 5 — 3 (без УТ); штриховые линии — расчет по (2).

сбросе энергии на возбуждение резонансного уровня. Этот механизм в предподжиговом режиме рассмотрен в [4] и экспериментально подтвержден в [5] результатами оптических измерений, показавших пространственную неоднородность свечения.

Таким образом, экспериментально установлено, что, измеряя «плавающий» потенциал эмиттирующего зонда, можно наблюдать трансформацию распределения потенциала в зазоре на различных участках ВАХ диода в предподжиговом режиме при $l_{\text{э}} \ll d$. В парах цезия при 24—240 Па для низких температур электродов $T \leq 700$ °С на начальном участке ВАХ распределение «плавающего» потенциала зонда по зазору соответствует закону прохождения заряженных частиц в электрическом поле при постоянной подвижности. При высоких $T=800$ °С даже на начальном участке ВАХ в зазоре имеется область слабого поля. Вблизи минимума кривой Паше́на развитие пробоя происходит через «провисание» потенциала, что подтверждает вывод [1—3] об образовании области квазинейтральной плазмы у катода за счет захвата медленных ионов в потенциальную яму.

Авторы выражают благодарность И. И. Касикову, А. В. Шутько, В. А. Жеребцову за проявленный интерес и участие в обсуждении результатов работы.

Список литературы

- [1] Бусыгин Э. П., Григорянц В. Г. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 8. С. 1530—1539.
- [2] Богданов А. А., Марциновский А. М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 8. С. 1552—1561.
- [3] Богданов А. А., Марциновский А. М. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 4. С. 655—702.
- [4] Бакинт Ф. Г., Иванов В. Г., Каплан В. Б. и др. // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 2. С. 274—283.
- [5] Бакинт Ф. Г., Иванов В. Г., Каплан В. Б. и др. // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 2. С. 284—291.
- [6] Физические основы термоэмиссионного преобразования энергии / Под ред. И. П. Стаханова. М.: Атомиздат, 1973. 274 с.
- [7] Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. М.: Мир, 1967. 387 с.
- [8] Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
- [9] Панкратов И. Л., Полянский В. А. Аэродинамика гиперзвуковых течений при наличии вдува. М., 1979. С. 181—200.

Поступило в Редакцию
2 января 1989 г.

В окончательной редакции
9 ноября 1989 г.