

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

Учет генерационно-рекомбинационных процессов в области объемного заряда перехода введением коэффициента m в аналитическую зависимость (1) дает хорошее совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей компонентов импеданса прямосмещенных диодов при небольших прямых смещениях, что позволяет в практических расчетах с достаточной степенью точности пользоваться выражениями (2)–(4).

При небольших прямых смещениях необходимо также учитывать влияние барьерной емкости.

Ввиду отсутствия общей теории реактивных свойств полупроводниковых диодов при любых уровнях инжекции носителей в случае достаточно больших заходов в прямую область характеристики диода для практических расчетов необходимо пользоваться аналитическими аппроксимациями экспериментальных кривых, аналогичных рис. 1 и 2.

Пользуясь экспериментальными данными, можно определить величины элементов эквивалентной моделирующей $p-n$ -переход схемы при прямых токах, на базе которой практически с достаточной степенью приближения можно изучать физические процессы в нелинейных резонансных цепях с полупроводниковыми диодами.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что $p-n$ -переход при прямых токах проявляет себя как сложное комплексное сопротивление, которое является не только нелинейным, но и заметно инерционным, что обуславливает целый ряд особенностей при использовании его в резонансных системах радиофизических устройств.

Авторы выражают благодарность А. Э. Юновичу за обсуждение результатов данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасев М. Д. «Успехи физических наук». 1959, 49, № 2, 217.
2. Карасев М. Д., Шарков Е. А. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. III, физ., астроном.», 1966, № 4, 112.
3. Абдуллаев Г. Б., Искендер-заде З. А. Некоторые вопросы физики электронно-дырочных переходов. Баку, 1971.
4. Пенин Н. А., Якунина К. В. «Радиотехника и электроника», 1957, 2, № 9, 1200.
5. Калашников С. Г., Пенин Н. А., Якунина О. В. «Радиотехника и электроника», 1956, 1, № 8, 1058.

Поступила в редакцию
23.1 1976 г.

Кафедра
физики колебаний

1/1/76

УДК 537.525.72

В. А. ГОДЯК, О. А. ПОПОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В работе [1] была предложена теоретическая модель высокочастотного разряда для диапазона частот $\omega_{0i}^2 \ll \omega^2 \ll \omega_{0e}^2$ где ω — частота ВЧ-поля, а ω_{0i} и ω_{0e} — ионно-и электронно-плазменные частоты. В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования ВЧ-разряда на частоте $f=15$ МГц в парах ртути в двух цилиндрических стеклянных трубках 1 ($\Phi=10$ см, $L=10$ см, $P=1,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) и 2 ($\Phi=7$ см, $L=20$ см, $P=9 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.). Дисковые внутренние электроды были выполнены из графита (1) и нержавеющей стали (2). С помощью усовершенствованной зондовой методики [2] были измерены в центре разрядного промежутка концентрации электронов n , температуры электронов V_e и постоянные составляющие потенциала плазмы V_0 .

На рис. 1, 2 и 3 представлены экспериментальные и расчетные значения параметров разряда в зависимости от $U = \frac{U_\infty}{V_e}$ — приведенной к V_e амплитуды ВЧ-напряжения на электродах. $\frac{n}{n_k}$ и $U = \frac{V_\infty}{V_e}$ рассчитывались по формулам [1]:

$$\frac{n}{n_k} = \left(\frac{\omega_{0e}}{\omega} \right)^2 = \left(\frac{v_{\text{эф}}}{\Omega} \right)^2 \frac{\left[\frac{\omega}{v_{\text{эф}}} \pm \sqrt{\frac{U^2}{U_p^2} - 1} \right]^2}{U_p \left[\frac{\omega}{v_{\text{эф}}} \pm \sqrt{\frac{U^2}{U_p^2} - 1} + \frac{\pi \ln \gamma}{U_p} \right]} \quad (1)$$

$$\eta_0 = \ln \gamma + \frac{\omega}{v_{\text{эф}}} \frac{U_p}{\pi} \pm \frac{1}{\pi} \sqrt{U^2 - U_p^2}, \quad (2)$$

где $n_k = \frac{\omega^2 m}{4\pi e^2}$; $U_p = \frac{V_p}{V_e}$ — приведенная амплитуда активной составляющей ВЧ-напряжения; $v_{\text{эф}}$ — эффективная частота столкновений электронов

$$v_{\text{эф}} = \nu + 2\Omega, \quad (3)$$

где ν — частота упругих столкновений электронов с нейтралими, $\Omega = \frac{v_{Te}}{L}$ — пролетная частота электронов, v_{Te} — тепловая скорость электронов, $\gamma = \sqrt{\frac{M}{2\pi m}}$, M и m — масса иона и электрона. Величина U_p рассчитывалась по формуле (4) работы [1].

$$U_p = \sqrt{2} \frac{E_{\parallel}}{V_{e\parallel}} L \sqrt{\frac{v_{\text{эф}}}{\nu} \left(1 + \frac{R}{L} \right)} \quad (4)$$

$v_{\text{эф}}$ получено из соотношения (3). E_{\parallel} и $V_{e\parallel}$ — напряженность продольного электрического поля и температура электронов в положительном столбе разряда постоянного тока,

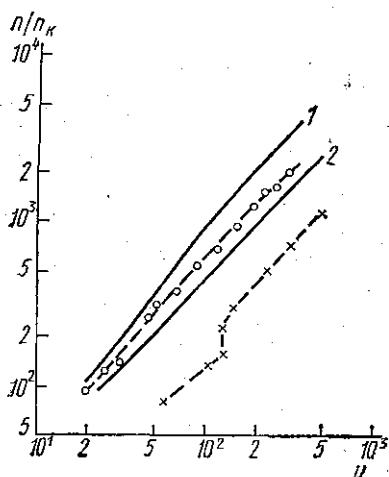


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические зависимости n/n_k от U . \circ — экспериментальные точки трубки 1, \times — экспериментальные точки трубки 2; сплошная линия — теория

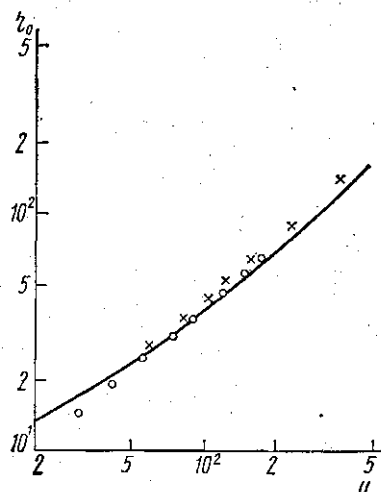


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические зависимости η_0 от U . Обозначения те же, что на рис. 1

имеющего те же PR , что и трубки 1 и 2. Правомерность такого подхода подтверждается совпадением электронных температур, измеренных в положительном столбе и ВЧ-разряде и соответствующих одним и тем же значениям PR и n [2]. Расчет U_p дал значения 1,62 (1) и 2,67 (2).

Как видно из рис. 1, экспериментальные и теоретические кривые $\frac{n}{n_k}(U)$ для обеих трубок качественно согласуются между собой. Количественные расхождения теории с экспериментом вызваны, по-видимому, пренебрежением в теории [1] пространственного распределения заряженных частиц и невыполнением в эксперименте условия, чтобы $2S_0 \ll L, R$. Для уменьшения толщины слоя S_0 необходимо увеличить

плотность плазмы n при тех же значениях U ($S_0 \sim \sqrt{\frac{U}{n}}$ на емкостной ветви разряда [1]). Этого же можно добиться повышением давления P или частоты ВЧ-поля ω .

На экспериментальной кривой $\frac{n}{n_k}(U)$ (трубка 2) имеется скачок при $U=130$. Причиной его появления может быть геометрический резонанс плазмы и слоев пространственного заряда на высших гармониках частоты генератора. Резонанс может возникнуть в ВЧ-разряде, если между какой-либо гармоникой основной частоты и электронной плазменной ω_{pe} устанавливается соотношение [3]:

$$(K\omega)^2 = \omega_{pe}^2 \frac{2S_0}{L}, \quad (5)$$

где $K=1, 2, 3 \dots$

Подставив в (5) значения S_0, L и ω_{pe} , соответствующее усредненной по объему концентрации электронов при $U=130$, получим $K_f=76$ мГц. Такая величина близка к 5-й гармонике основной частоты 15 мГц.

Этот эффект может иметь место либо при наличии высших гармоник в питающем разряд ВЧ-напряжении [4], либо как следствие нелинейности слоев пространственного разряда. В последнем случае в силу геометрической симметрии ВЧ-разряда могут возникнуть лишь нечетные гармоники тока, на которых и может произойти геометрический резонанс. В разрядной трубке 1 скачков на

экспериментальной кривой $\frac{n}{n_k}(U)$ не наблюдалось, так как во время эксперимента форма ВЧ-напряжения и тока контролировалась осциллографом и поддерживалась синусоидальной во всем диапазоне V_{ω} .

Подтверждением неизменности механизма поддержания разряда до и после скачка служит хорошее согласие экспериментальных и теоретических, рассчитанных по формуле (2), значений η_0 (рис. 2). Совпадение расчетных кривых для обеих трубок связано с малостью второго члена в правой части выражения (2).

Наблюдаемый в трубке 2 при $U=130$ небольшой скачок температуры электронов (рис. 3) указывает на то, что V_e определяется в ВЧ-разряде не ВЧ-напряжением, а, как и в разряде постоянного тока, степенью ионизации плазмы. Как следует из сравнения элект-

ронных температур, $V_{e1} < V_{e2}$, так как $(PR)_1 > (PR)_2$. Таким образом, проведенные исследования ВЧ-разряда на частоте 15 мГц показали удовлетворительное согласие теории [1] с экспериментом. Имеющиеся расхождения вызваны, по-видимому, неучетом в теории пространственного распределения заряженных частиц и нарушением условия теории $2S_0 \ll L, R$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Годяк В. А. «Физика плазмы», 1976, 2, № 1.
2. Godjak V. A., Kuzovnikov A. A., Porov O. A. Proc. XII Int. Conf. on Ion Phen. in Gases. Eindhoven, Netherlands, 1975, p. 109.
3. Vandenplas P. E., Gould R. W. «Physica», 1962, 28, 357.
4. Vacri J., Saint-Martin C. «Nuovo Cim.», 1969, 62 B, N-1, 81.

Поступила в редакцию
5.3 1976 г.

Кафедра
электроники