

01;11  
©1995

## ВЛИЯНИЕ СИЛЫ МИЛЛЕРА НА НАЧАЛЬНУЮ СТАДИЮ ВЭР НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА В ВАКУУМЕ

*Е.А.Галстыян*

Сила Миллера имеет большое значение в начальной стадии развития вторично-эмиссионного разряда (ВЭР), вызванного мощным СВЧ полем на поверхности диэлектрика. Как известно, она обусловлена неоднородностью СВЧ поля вблизи поверхности. В случае касательного к поверхности диэлектрика электрического поля эта сила является единственной возвращающей силой для вторичных электронов до тех пор, пока диэлектрик существенно не зарядится. Этот факт хорошо известен. Влияние силы Миллера на ВЭР исследовалось экспериментально [1], однако полученные результаты довольно противоречивы. В частности, не удалось попытки существенно воздействовать на ВЭР с помощью силы Миллера. Все это заставляет обратиться к более тщательному анализу роли этой силы в развитии ВЭР на поверхности диэлектрика в вакууме.

В качестве модели рассмотрим бесконечную диэлектрическую плоскость (полупространство), облучаемую электромагнитной волной так, что электрическое поле волны лежит в плоскости поверхности диэлектрика (вдоль оси  $X$ , ось  $Z$  перпендикулярна плоскости). В начале процесса в пространстве имеются только фоновые электроны, которые, бомбардируя поверхность диэлектрика, дают начало разряду. Рассмотрим простейший случай зарядки диэлектрической поверхности без учета силы Миллера. Линейная зависимость плотности поверхностного заряда  $n_0$  от времени дается уравнением

$$dn_0 = (j_f/e) \overline{(\sigma - 1)} dt,$$

где  $j_f$  — плотность тока фоновых электронов,  $e$  — заряд электрона и  $(\sigma - 1)$  — коэффициент вторичной эмиссии, усредненный по углу, энергии электронов и фазе СВЧ поля. При этом в качестве аппроксимирующей функции взята функция, хорошо описывающая коэффициент вторичной эмиссии в широком классе металлов, полупроводников и диэлектриков:

$$\sigma(W, \theta) = \exp(-\gamma \cos \theta) \begin{cases} (W/W_1)^2 \exp[-2(W - W_1)/W_m], & W < W_m, \\ \sigma_m - (\sigma_m - 1)(W - W_m)/(W_2 - W_m), & W > W_m; \end{cases}$$

здесь  $W$  — энергия электрона в СВЧ поле,  $\theta$  — угол полета электрона к плоскости,  $\sigma_m$  — максимальное значение коэффициента ВЭ и  $W_m$  — соответствующая энергия,  $W_1$ ,  $W_2$  — первый и второй потенциалы,  $\gamma$  — коэффициент угловой зависимости. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведена зависимость от интенсивности СВЧ излучения (длина волны 3 см) числа электронов, эмитированных одним электроном. Такого рода зависимость и плотность тока фоновых электронов позволяют нам оценить время зарядки поверхности диэлектрика. Плотность тока фоновых электронов можно взять только из эксперимента, так как эта величина сильно зависит от конкретных условий его проведения. Для оценок остановимся на цифре  $j_f \cong 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>, приведенной в работе [1]. Заряд поверхности диэлектрика начинает влиять на развитие ВЭР при условии  $n_0 > 10^6$  1/см<sup>2</sup> [2], поэтому мы оценим время  $T_1$ , необходимое для зарядки поверхности именно до этой величины. Как видно из рис. 1, в этом случае  $T_1 \geq 500$  нс. Временная зависимость поверхностного заряда существенно отличается от линейной, если принять во внимание силу Миллера. Если эта сила направлена к поверхности и достаточно велика, чтобы вернуть к ней вторичные электроны, то плотность поверхностного

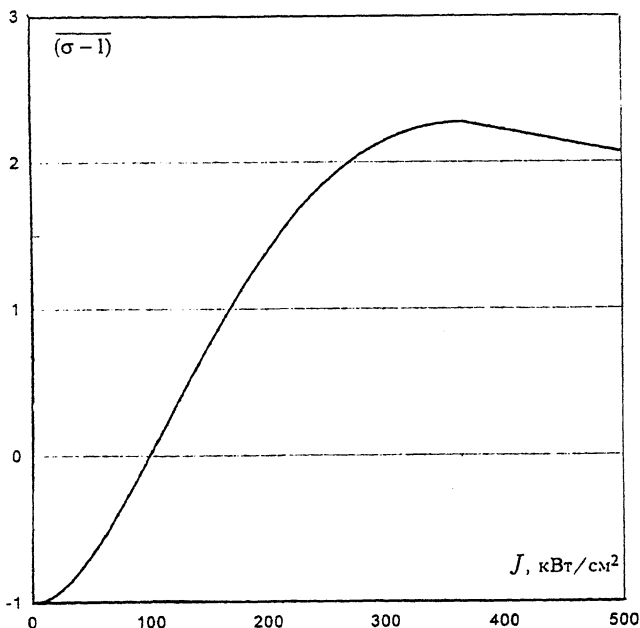


Рис. 1. Зависимость среднего числа эмитированных электронов от интенсивности СВЧ излучения  $J$ . Параметры диэлектрика:  $W_1 = 25$  эВ,  $W_m = 65$  эВ,  $W_2 = 250$  эВ,  $\sigma_m = 2.2$ ,  $\gamma = 0.55$ .

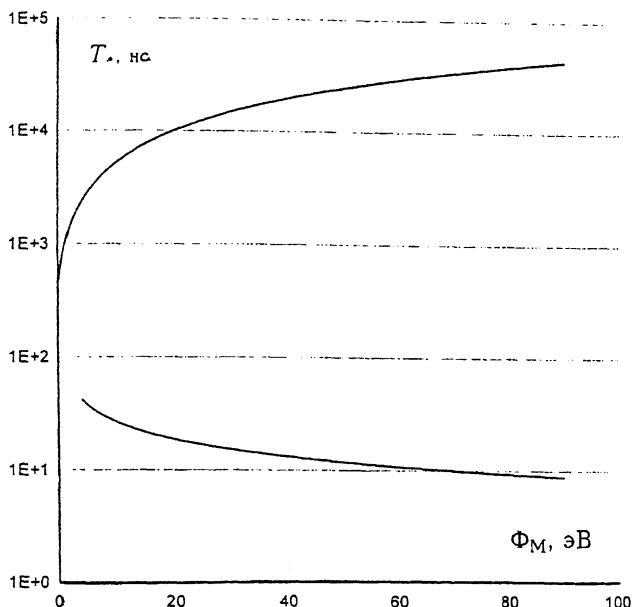


Рис. 2. Зависимость времени зарядки поверхности от величины и знака квазипотенциала Миллера ( $\epsilon = 5$ ,  $\lambda = 3$  см,  $J = 500$  кВт/см<sup>2</sup>).

заряда растет экспоненциально с показателем  $\alpha t$

$$\alpha = 4V_0 \sqrt{\Phi_m / W_0} / \lambda.$$

Здесь  $W_0 = 4$  эВ — средняя энергия вторичных электронов, а  $V_0$  — их соответствующая скорость вылета,  $\Phi_M > W_0$  — квазипотенциал Миллера [3],  $\lambda$  — длина волны СВЧ излучения. В общем случае в неоднородном СВЧ поле на электрон действует сила

$$\bar{F}_M = -(e^2 / 4m\omega^2) \text{grad}(\bar{E} \cdot \bar{E}^*) = -\text{grad} \Phi_M,$$

где  $e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона,  $\omega$  — частота, а  $\bar{E}$  — комплексная амплитуда электрического поля волны,  $\bar{F}_M$ ,  $\Phi_M$  — сила Миллера и ее квазипотенциал. Для диэлектрического полупространства, облучаемого электромагнитной волной, явный вид выражений для силы Миллера:

$$F_M = -(e^2 E_0^2 / m\omega^2) \cdot k R_e \sin(2kz \cos \Theta_0) \cos \Theta_0,$$

$$F_m = -(e^2 E_0^2 / m\omega^2) \cdot k R_m \sin(2kz \cos \Theta_0) \cos \Theta_0 \cos 2\Theta_0$$

соответственно для электрической и магнитной поляриза-  
ций волны;  $k = \omega/c$ ,  $\Theta_0$  — угол падения волны,  $R$  — коэф-  
фициент отражения для двух поляризаций волны. В втором  
случае с ростом угла меняется не только величина силы  
Миллера, но и ее знак, т. е. существует диапазон углов  
 $\Theta_0$ , при которых сила Миллера отталкивает электроны от  
поверхности диэлектрика. Необходимо отметить, что си-  
ла Миллера, направленная от поверхности диэлектрика, не  
может ее защитить от ВЭР, если имеются фоновые элект-  
троны. Действительно, квазипотенциал Миллера является  
периодической функцией координаты  $Z$  и, следовательно,  
не меняет среднюю энергию фоновых электронов, а толь-  
ко перераспределяет ее. Только часть фоновых электронов  
может быть заперта в потенциальных ямах, а оставшиеся  
смогут достигнуть поверхности диэлектрика. Все это при-  
ведет просто к затяжке стадии линейного роста поверхност-  
ной плотности заряда, т. е. времени  $T_1$ . На рис. 2 приведе-  
ны зависимости времени зарядки  $T_1$  от величины квазипо-  
тенциала Миллера при  $\epsilon = 5$ ,  $\lambda = 3$  см. Верхняя кривая со-  
ответствует силе Миллера, направленной от поверхности,  
нижняя — обратному направлению. При этом абсолютное  
значение квазипотенциала меняется от нуля до максималь-  
ной осцилляторной энергии электрона, соответствующей  
интенсивности СВЧ излучения  $J = 500$  кВт/см<sup>2</sup>.

Таким образом, влияние силы Миллера на начальной  
стадии ВЭР действительно велико: она определяет харак-  
тер временной зависимости плотности поверхностного за-  
ряда диэлектрика и, следовательно, время зарядки, которое  
в зависимости от величины и направления силы Миллера  
меняется в диапазоне четырех порядков. Это может быть  
существенно при изучении ВЭР, возникающего под воздей-  
ствием импульсного СВЧ излучения.

#### Список литературы

- [1] Гришин Л.И., Дорофеев А.А., Косый И.А. и др. // Труды ФИАН.  
М., 1977. Т. 92. С. 82–131.
- [2] Ravaev A.A., Galstjan E.A. // Proc. SPIE. V. 2259. 1994. P. 340–343.
- [3] Гапонов А.В., Миллер М.А. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. Вып. 2. С. 242–  
243.

Московский  
радиотехнический институт  
РАН

Поступило в Редакцию  
5 мая 1995 г.