

02;06;11

## **О согласовании линии со взрывоэмиссионным диодом в устройствах локальной терапии**

© Г.А. Месяц

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
E-mail: mesyats@pran.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2002 г.

Для целей локальной терапии предложено использовать взрывоэмиссионные диоды для генерации импульсов рентгеновского излучения. Эти импульсы обычно подаются на диод по тонкому кабелю. Для эффективной работы такой системы необходимо, чтобы в диоде поглощалась максимально возможная импульсная энергия, подаваемая к нему по электрическому кабелю. Учитывая, что диод имеет нелинейную вольт-амперную характеристику, согласование диода с линией в общем виде невозможно. В статье предлагается производить согласование диода и нагрузки подбором формы импульса напряжения, подаваемого на диод. Для взрывоэмиссионного диода с плоскими электродами практически полное согласование достигается для импульсов напряжения треугольной формы.

В 1979 г. мною было предложено использовать миниатюрные диоды со взрывной эмиссией электронов для облучения опухолей в полостях человеческого тела или на его поверхности [1]. Для этого генератор наносекундных импульсов ( $t_p \leq 1 \text{ ns}$ ) с амплитудой  $10^5 \text{ V}$  и более подавался по тонкому коаксиальному кабелю, который был нагружен на взрывоэмиссионный рентгеновский диод. Из-за малой длительности импульса диаметр кабеля составляет несколько миллиметров. Такого же диаметра должен быть диод.

Одна из проблем, которая при этом возникает — надежность работы кабеля и диода, а также эффективность поглощения энергии электронами диода. Для решения этих проблем необходимо согласовать диод, который имеет нелинейное сопротивление, с волновым сопротивлением кабеля. Используя вольт-амперные характеристики взрывоэмиссионных диодов [2], можно подобрать такую форму импульса напряжения, при которой сопротивление диода в течение длительности импульса

будет оставаться постоянным. Это устранит отраженные импульсы и позволит с наибольшей эффективностью передавать энергию импульса в электронный пучок рентгеновского диода.

В общем виде вольт-амперная характеристика таких диодов имеет вид динамической характеристики Чайльда–Ленгмюра [2]:

$$i(t) = AU^{3/2}(t)F\left(\frac{vt}{d}\right), \quad (1)$$

где  $i(t)$  — электронный ток;  $U(t)$  — напряжение, приложенное к диоду;  $A$  — константа и  $F\left(\frac{vt}{d}\right)$  — функция, которые зависят от геометрии диода;  $d$  — расстояние между катодом и анодом;  $v$  — скорость движения катодной плазмы;  $t$  — время. Значения величин  $A$  и  $F$  для различных типов диодов приведены в [2,3]. Из (1) следует, что ток, напряжение, а следовательно, сопротивление диода будут зависеть от времени. Поэтому возникает вопрос, как согласовать диод с линией передачи, по которой напряжение  $U(t)$  поступает на диод. При отсутствии согласования в линии появляются отраженные от диода волны, которые затем, отразившись от выходной нагрузки импульсного генератора, вновь возвращаются к диоду, мешая его нормальной работе. Покажем, что при заданном диоде условие согласования можно соблюсти, подобрав зависимости напряжения от времени.

Обозначим волновое сопротивление линии через  $Z_0$ , а сопротивление диода —  $R_d$ . Сопротивление  $R_d = U(t)/i(t)$ , т. е., согласно (1):

$$R_d(t) = \frac{1}{AF\left(\frac{vt}{d}\right)U^{1/2}(t)}. \quad (2)$$

Условие согласования линии и диода

$$R_d = Z_0, \quad (3)$$

т. е. сопротивление  $R_d$  не должно зависеть от времени. В этом случае условие (3) может быть соблюдено, если

$$U(t) = \frac{1}{A^2Z_0^2F^2\left(\frac{vt}{d}\right)}. \quad (4)$$

Это означает, что если зависимость напряжения от времени будет соответствовать формуле (4), то диод и линия будут согласованы

идеально, т.е. от диода не будут уходить отраженные волны, а сам диод будет полностью воспринимать энергию импульса.

Рассмотрим диод с цилиндрическим катодом с диаметром  $D_1$ , у которого  $D_1 \gg d$ , а эмиссия электронов идет с торца цилиндра. В этом случае [2,3]:

$$F\left(\frac{vt}{d}\right) = \left(1 - \frac{vt}{d}\right)^{-2}, \quad (5)$$

$$A = \frac{\pi A_0 D_1^2}{4d^2}, \quad (6)$$

где  $A_0 = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ А}^2 \cdot \text{В}^{-3/2}$  — постоянная в классической формуле Чайльда–Ленгмюра. В этом случае формула (4) запишется в виде

$$U(t) = \frac{16d^4 \left(1 - \frac{vt}{d}\right)^4}{A_0^2 \pi^2 D_1^4 Z_0^2}. \quad (7)$$

Запишем напряжение в форме  $U(t) = U_0 f(t)$  и рассмотрим только случай

$$\frac{vt}{d} \ll 1. \quad (8)$$

Тогда можно принять, что  $\left(1 - \frac{vt}{d}\right)^4 \approx \left(1 - \frac{4vt}{d}\right)$ . В этом случае

$$U_0 f(t) \approx \frac{16d^4}{A_0^2 \pi^2 D_1^4 Z_0^2} \left(1 - \frac{4vt}{d}\right). \quad (9)$$

Из (9) следует, что линия и диод будут согласованы, если импульс напряжения будет иметь треугольную форму с амплитудой

$$U_0 = \frac{16d^4}{A_0^2 \pi^2 D_1^4 Z_0^2} \quad (10)$$

и временной функцией

$$f(t) = 1 - \frac{4vt}{d}. \quad (11)$$

Длительность импульса на полувисоте составит

$$t_p = \frac{d}{8v}, \quad (12)$$

т.е. соотношение (8)  $\frac{vt}{d} \ll 1$  соблюдается. Напряжение  $U_0$  выбирается из условий прочности кабеля, по которому импульс посылается на

диод, или же параметров рентгеновского или электронного излучения. Например, пусть  $U_0 = 3 \cdot 10^4$  В, а волновое сопротивление кабеля  $Z_0 = 50 \Omega$ . Известно, что величина  $A_0 = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2 \cdot \text{V}^{-3/2}$ . В этом случае из формулы (10) следует, что

$$D_1/d = 8. \quad (13)$$

Величина  $D_1$  определяется при условии, что коаксиальный диод имеет волновое сопротивление, равное  $Z_0$ , т. е.

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg \frac{D_2}{D_1}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции диода. Для вакуума  $\varepsilon = 1$ . Если принять во внимание, что внешний диаметр коаксиального диода  $D_2 = 2$  мм, то, согласно (14),  $D_1 = 0.87$  мм. Тогда, согласно (13),  $d = 0.11$  мм. Оптимальная длительность импульса определится из (12) и составит  $\sim 0.9$  нс, так как если считать катод графитовым, то  $v = 1.5 \cdot 10^6$  см/с.

Итак, мы показали, что, подбирая форму импульса, можно добиться согласования линии, по которой передается импульс напряжения, с диодом со взрывной эмиссией. Для импульса треугольной формы при амплитуде напряжения 30 кВ и коаксиальном вакуумном диоде с волновым сопротивлением  $50 \Omega$  такое согласование имеет место при межэлектродном зазоре  $d = 0.11$  мм, диаметре катода  $D_1 = 0.87$  мм и длительности импульса на полувывоте  $t_p = 0.9$  нс.

## Список литературы

- [1] *Mesyats G.A.* // Proc. 2nd IEEE International Pulsed Power Conference. Lubbock (Texas), June 12–14, 1979. Lubbock, 1979. P. 9–16.
- [2] *Месяц Г.А.* // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 7. С. 1521–1527.
- [3] *Mesyats G.A.* Explosive Electron Emission. Ekaterinburg: URO-Press, 1998. 239 p.