

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  $A_0 = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2 \cdot \text{V}^{-3/2}$  — 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  $U_0 = 3 \cdot 10^4$  V, 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  $D_2 = 2$  mm, то, согласно (14),  $D_1 = 0.87$  mm. Тогда, согласно (13),  $d = 0.11$  mm. Оптимальная длительность импульса определится из (12) и составит  $\sim 0.9$  ns, так как если считать катод графитовым, то  $v = 1.5 \cdot 10^6$  cm/s.

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 kV и коаксиальном вакуумном диоде с волновым сопротивлением  $50 \Omega$  такое согласование имеет место при межэлектродном зазоре  $d = 0.11$  mm, диаметре катода  $D_1 = 0.87$  mm и длительности импульса на полувывоте  $t_p = 0.9$  ns.

## 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.