

## Расчет влияния параметров шунтов на эффект $dV/dt$ в мощных фототиристорах

*Д.С. Силкин, В.П. Падеров*

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия*

## Calculation of Influence of Shunt Parameters on $dV/dt$ Effect in Power Photothyristors

*D.S. Silkin, V.P. Paderov*

*National Research Mordovia State University, Saransk, Russia*

Представлен расчет влияния топологических параметров шунтов в катодных областях фототиристора на эффект  $dV/dt$ . Получено аналитическое условие, позволяющее в первом приближении определить, в какой области начнется включение структуры из-за эффекта  $dV/dt$ . Полученное условие может быть использовано при проектировании фототиристоров со встроенной защитой от разрушения при неконтролируемом включении, вызванном эффектом  $dV/dt$ .

*Ключевые слова:* фототиристор; усилительные затворы; эффект  $dV/dt$ .

The calculation of the influence of the topological parameters of shunts in the cathode regions of the photothyristor on the  $dV/dt$  effect has been presented. The analytical condition, permitting in first approximation to determine in which region the structure switching will start due to  $dV/dt$  effect, has been obtained. This condition can be used in designing the photothyristors with the built-in protection against destruction during the uncontrolled turn on of the  $dV/dt$  effect. The high-voltage photothyristors in serial connection are applied, in particular, in the high-voltage direct current transmission lines. One of the main requirements for these devices is the availability of protection against overvoltage and  $dV/dt$  effect.

*Keywords:* photothyristor; amplifying gate;  $dV/dt$  effect.

**Введение.** Высоковольтные фототиристоры в последовательном соединении применяются, в частности, в высоковольтных линиях передачи электроэнергии на постоянном токе. Одним из требований к этим приборам является наличие встроенной защиты от перенапряжения и эффекта  $dV/dt$ . При нарастании прямого напряжения на тиристорной структуре, находящейся в выключенном состоянии, ток смещения, протекающий через барьерную емкость обратносмещенного перехода  $p$ -база –  $n$ -база, вызывает самопроизвольное включение структуры. Так проявляется эффект  $dV/dt$  в тиристорах [1].

В силовых высоковольтных фототиристорах с рабочими токами несколько килоампер включение осуществляется вспомогательными структурами – усилительными за-

творами (amplifying gate) [2], которые обеспечивают большой ток включения и высокую скорость распространения включенного состояния в области основного катода. Если спроектировать прибор так, чтобы при возникновении эффекта  $dV/dt$  первыми включались усилительные затворы, то структура будет открываться в режиме, близком к нормальному, что обезопасит ее от разрушения [3].

**Методика расчета.** На рис.1 показан маршрут распространения тока смещения в тиристорной структуре. В области усилительных затворов отсутствует электрический контакт с внешней схемой, поэтому ток смещения оттуда стекается к области основного катода тиристора. Ток течет в приповерхностной области, где сопротивление минимально, а плотность тока смещения постоянно растет, приближаясь к шунту основного катода. При наличии шунта в усилительном затворе ток будет проходить через шунт по металлизации над  $n^+$ -областью усилительного затвора.

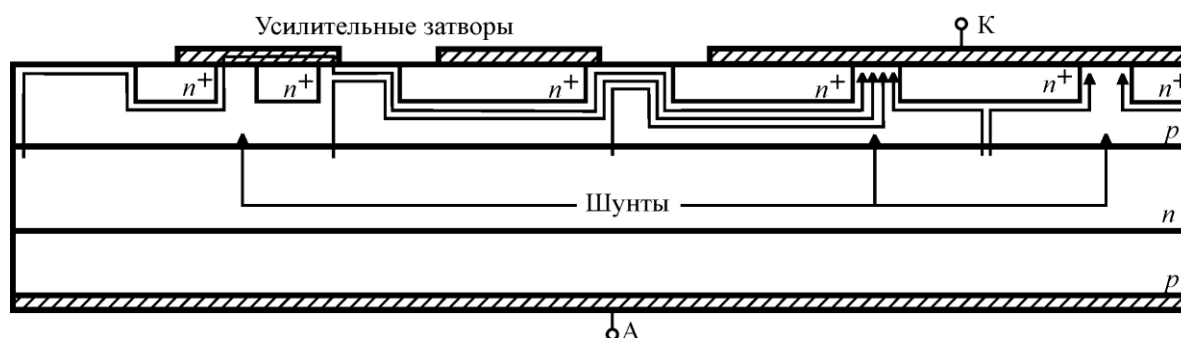


Рис.1. Маршрут протекания тока смещения в фототиристоре с усилительными затворами

Включение структуры произойдет, когда протекающий ток смещения создаст под одной из  $n^+$ -областей напряжение, равное значению  $V_{bi}$ , при котором имеет место эффективная инжекция электронов через  $n^+-p$ -переход. Напряжение под  $n^+$ -областью вычисляется согласно выражению

$$V = I_s R = j_s S \rho_s K_f = K j_s \rho_s, \quad (1)$$

где  $I_s$  – ток смещения, протекающий в горизонтальном направлении под  $n^+$ -слоем в направлении катода;  $R$  – сопротивление области под  $n^+$ -слоем, через которую протекает ток  $I_s$ ;  $j_s$  – плотность тока смещения;  $S$  – эффективная площадь, с которой собирается ток смещения;  $\rho_s$  – поверхностное сопротивление  $p$ -базы под  $n^+$ -слоем;  $K_f$  – коэффициент формы области под  $n^+$ -слоем;  $K = SK_f$  – интегральный коэффициент, учитывающий влияние топологии выбранной  $n^+$ -области на падение напряжения  $V$  вдоль этой области.

Плотность тока смещения  $j_s$  определяется как произведение удельной емкости  $p$ - $n$ -перехода  $C_j$  на скорость изменения напряжения  $dV/dt$ . Подставив это произведение в (1) и приравняв напряжение  $V$  к прямому падению напряжения  $V_{bi}$  на переходе, можно выразить значение  $(dV/dt)_{crit}$ , при котором произойдет включение:

$$\left( \frac{dV}{dt} \right)_{crit} = \frac{V_{bi}}{C_j \rho_s K}. \quad (2)$$

Однако из-за того, что удельная емкость  $p$ - $n$ -перехода  $C_j$  зависит от напряжения, формула (2) для аналитического расчета  $(dV/dt)_{crit}$  не может использоваться. Тем не менее, даже не зная точного значения  $(dV/dt)_{crit}$ , можно предсказать, в какой области фототиристора

произойдет включение. Для этого нужно сравнить напряжения под разными  $n^+$ -областями  $V_1$  и  $V_2$  в один момент времени. Плотность тока смещения при этом будет одинакова для всей структуры. Поверхностные сопротивления также равны, поскольку все  $n^+$ -области создаются в ходе одной диффузии. Тогда с учетом (1) отношение  $V_1/V_2$  можно записать как

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{K_1 j_s \rho_s}{K_2 j_s \rho_s} = \frac{K_1}{K_2}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что первым от эффекта  $dV/dt$  будет открываться тот участок структуры, для которого значение коэффициента  $K$  будет больше. Рассмотрим вычисление этого коэффициента на примере фрагмента структуры усилительного затвора с цилиндрическими шунтами (рис.2).

Ток смещения, проходя от центра структуры, под  $n^+$ -слоем будет стекаться к шунту. Схематически это показано на рис.2. В первом приближении можно полагать, что ток протекает по трапециевидному участку структуры, который на рис.2 заштрихован. На этой области будет возникать наибольшее падение напряжения, и включение от эффекта  $dV/dt$  будет наблюдаться у внутренней границы этой области. Ток смещения, собираемый шунтом вне заштрихованной области, не дает существенной добавки в падение напряжения на трапециевидной области, поэтому им можно пренебречь.

Выражение для коэффициента  $K$  получим, рассчитав падающее на этой области напряжение. Это напряжение можно представить суммой напряжения  $V_{area}$ , создаваемого на трапециевидной области током смещения  $I_{area}$ , собранным с окружности радиусом  $r$  и распределенным между шунтами, и напряжения  $V_{trap}$ , создаваемого током  $I_{trap}$ , собираемым внутри трапециевидной области.

Ток  $I_{area}$  определяется по формуле

$$I_{area} = \frac{j_s S_{area}}{n} = j_s \frac{\pi r^2}{n}, \quad (4)$$

где  $S_{area}$  – площадь окружности, с которой собирается ток смещения;  $n$  – число шунтов, между которыми распределяется ток смещения.

Сопротивление трапециевидной области  $R_{trap}$  можно рассчитать, зная поверхностное сопротивление  $\rho_s$   $p$ -базы под катодным  $n^+$ - $p$ -переходом. Для этого трапециевидную область (рис.3) с основаниями  $a$  и  $b$  и высотой  $l$  представим в виде последователь-

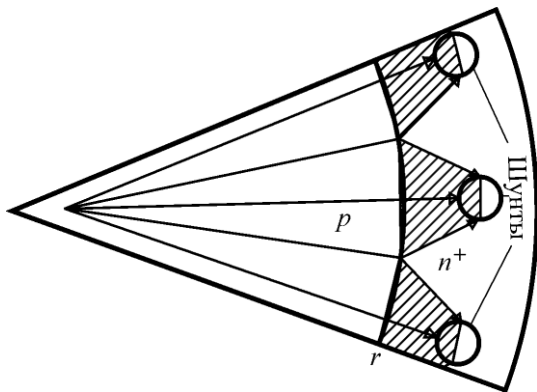


Рис.2. Фрагмент структуры усилительного затвора с шунтами (стрелками показаны линии протекания тока)

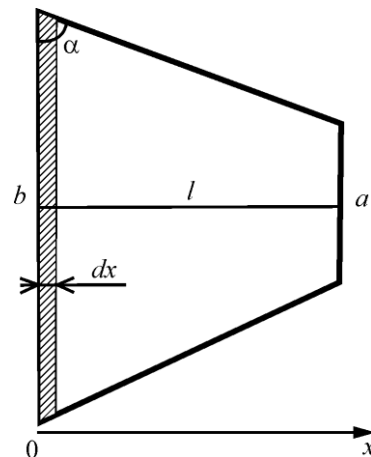


Рис.3. Трапециевидная область структуры усилительного затвора

ного соединения прямоугольных резисторов длиной  $dx$  и шириной  $b(x)$ . Величину  $b(x)$  можно определить как  $b(x) = (b - 2x)/\operatorname{tg}\alpha$ , где  $\operatorname{tg}\alpha = 2l/(b-a)$ .

Полное сопротивление трапецидальной области есть сумма сопротивлений резисторов и определяется через интеграл

$$R_{trap} = \rho_s \int_0^l \frac{dx}{b(x)} = \rho_s \frac{l}{b-a} \ln\left(\frac{b}{a}\right). \quad (5)$$

Зная сопротивление и ток, найдем напряжение:

$$V_{area} = I_{area} R_{trap} = j_s \rho_s \frac{\pi r^2}{n} \frac{l}{b-a} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = j_s \rho_s K_{area}, \quad (6)$$

где  $K_{area}$  – интегральный коэффициент, учитывающий влияние топологии структуры на падение напряжения  $V_{area}$ .

Для расчета напряжения  $V_{trap}$  рассмотрим трапецидальную область протекания тока смещения (см. рис.3). Выделим здесь бесконечно узкую область с шириной  $dx$ , стремящейся к нулю.

Ток  $dI(x)$ , собранный в этой области, будет создавать падение напряжения на оставшейся части трапецидальной области, имеющей сопротивление  $R(x)$ . Этот ток можно описать выражением

$$dI(x) = j_s b(x) dx. \quad (7)$$

Сопротивление  $R(x)$  вычисляется по формуле (5) с учетом зависимости параметров  $b$  и  $l$  от  $x$ :

$$R(x) = \frac{l(x)}{b(x) - a} \ln\left(\frac{b(x)}{a}\right) \rho_s. \quad (8)$$

Зависимости  $l(x)$  и  $b(x)$  можно описать выражениями

$$l(x) = l - x, \quad b(x) = b - 2x/\operatorname{tg}\alpha. \quad (9)$$

Напряжение  $V_{trap}$  будет равно сумме произведений токов и сопротивлений  $dI(x)R(x)$  при изменении  $x$  от нуля до  $l$ , что по определению является интегралом. Таким образом, запишем

$$V_{trap} = \int_0^l j_s \rho_s \left(b - x \frac{b-a}{l}\right) (l-x) \left(b - x \frac{b-a}{l} - a\right)^{-1} \ln\left[\left(b - x \frac{b-a}{l}\right) a^{-1}\right] dx. \quad (10)$$

Интеграл (10) может быть вычислен и после некоторых преобразований приведен к виду

$$V_{trap} = j_s \rho_s \left(\frac{l}{a-b}\right)^2 \left[\frac{b^2}{2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{a^2 - b^2}{4}\right] = j_s \rho_s K_{trap}, \quad (11)$$

где  $K_{trap}$  – интегральный коэффициент, учитывающий влияние топологии структуры на падение напряжения  $V_{trap}$ .

Полное напряжение на трапецидальном участке можно записать как

$$V = V_{area} + V_{trap} = j_s \rho_s (K_{area} + K_{trap}) = j_s \rho_s K. \quad (12)$$

Аналогичным образом вычисляется коэффициент  $K$  для основного катода. Однако в этом случае вместо площади  $S_{area}$  в формулу (4) следует подставить полную площадь управляющей области фототиристора, которая включает в себя фоточувствительный затвор, усилительные затворы и «снежинку» – разветвленную металлизированную область, обеспечивающую высокую площадь первоначального включения. Расчет напряжения  $V_{trap}$  для основного катода полностью аналогичен расчету для усилительного затвора и выполняется по формуле (11), где значения  $l$ ,  $a$  и  $b$  соответствуют основному катоду. Тогда, подставив (11) и (6) в (12), а получившийся результат – в (3), запишем условие для обеспечения встроенной защиты структуры от разрушения при включении, вызванном эффектом  $dV/dt$ :

$$\left\{ \frac{\pi r_g^2}{n_g} \frac{l_g}{b_g - a_g} \ln\left(\frac{b_g}{a_g}\right) + \left(\frac{l_g}{a_g - b_g}\right)^2 \left[ \frac{b_g^2}{2} \ln\left(\frac{b_g}{a_g}\right) + \frac{a_g^2 - b_g^2}{4} \right] \right\} \times \left\{ \frac{S_{area c}}{n_c} \frac{l_c}{b_c - a_c} \ln\left(\frac{b_c}{a_c}\right) + \left(\frac{l_c}{a_c - b_c}\right)^2 \left[ \frac{b_c^2}{2} \ln\left(\frac{b_c}{a_c}\right) + \frac{a_c^2 - b_c^2}{4} \right] \right\}^{-1} > 1, \quad (13)$$

где индекс  $g$  обозначает параметры заданного усилительного затвора, а индекс  $c$  – параметры основного катода.

В выражении (13)  $a_g$  равно диаметру круглого шунта в усилительном затворе,  $b_g$  можно в первом приближении связать с  $r_g$  отношением  $b_g = 2\pi r_g/n_g$ , где  $2\pi r_g$  – длина окружности;  $n_g$  – число шунтов. Для основного катода также можно принять  $a_c$  равным диаметру шунта, а  $b_c$  – расстоянию между центрами двух шунтов.

Шунтировка в области основного катода оказывает влияние на абсолютное значение  $(dV/dt)_{crit}$  [4], поэтому параметры в знаменателе выражения (13), как правило, не могут быть изменены. Шунтировка усилительного затвора должна быть спроектирована так, чтобы длина боковой грани трапеции (см. рис.3) не превышала ширины кольца  $n^+$ -области усилительного затвора. В противном случае ток смещения, вместо того чтобы стекаться к шунтам, будет проходить между ними. Это условие налагает ограничения на минимальное число шунтов в усилительном затворе  $n_g$  и связанную с ним величину  $b_g$ . Для увеличения числителя в условии (13) также можно увеличивать расстояние от края  $n^+$ -области до шунта  $l_g$  либо уменьшать диаметр шунта в усилительном затворе  $a_g$ . Однако нужно учитывать, что минимальное значение диаметра шунта ограничено боковой диффузией  $n^+$ -области. Поэтому рациональнее всего увеличивать значение числителя в выражении (13), увеличивая параметр  $l_g$ .

**Моделирование.** Для проверки условия (13) проведено трехмерное физико-топологическое моделирование элементарной ячейки фототиристора с несколькими усилительными затворами в программе Synopsys TCAD. Методика выбора такой ячейки описана в работе [5]. В качестве исходных данных в области усилительных затворов использовались следующие значения параметров:  $a_g = 0,022$  см,  $b_g = 0,071$  см,  $r_g = 0,135$  см,  $n_g = 12$ ,  $l_g = 0,03$  см, в области основного катода  $a_c = 0,035$  см,  $b_c = 0,095$  см,  $S_{area c} = 0,135$  см<sup>2</sup>,  $n_c = 1158$ ,  $l_c = 0,03$  см.

В процессе моделирования расстояние от края  $n^+$ -области до шунта  $l_g$  в усилительном затворе увеличивалось с шагом 0,001 см до тех пор, пока эффект  $dV/dt$  в области усилительного затвора не начал возникать раньше, чем в области основного катода. Полученное таким образом значение  $l_g$  составило 0,045 см.

Левая часть в условии (13) рассчитывалась при заданных значениях параметров. Параметр  $l_g$  постепенно увеличивался от 0,03 см с шагом 0,001 см. При таком шаге приращение в левой части (13) не превышало 0,025. Условие (13) начало выполняться при  $l_g = 0,051$  см. Левая часть в (13) при этом была равна 1,018.

Затем значение  $l_g$ , при котором произошло включение области под усилительным затвором от эффекта  $dV/dt$  во время моделирования, сравнивалось с минимальным значением  $l_g$ , при котором начало выполняться условие (13). Сравнение показало, что условие (13) дает завышенное по сравнению с моделированием значение  $l_g$  с погрешностью в пределах 15 %. Эта погрешность обусловлена в том числе выбором шага. Максимальная погрешность, связанная с шагом, не превышает 2,3 %.

**Заключение.** Полученное условие позволяет в первом приближении подобрать параметры шунтов в областях усилительных затворов и основного катода для обеспечения встроенной защиты фототиристора от разрушения при включении, вызванном эффектом  $dV/dt$ .

### Литература

1. **Блихер А.** Физика тиристорov: пер. с англ. под ред. И.В. Грехова. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 264 с.
2. Semiconductor Power Devices, Physics, Characteristics, Reliability / **J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. De Doncker.** – Heidelberg: Springer, 2011. – 538 p.
3. **Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J.** Kellner-Werdehausen U. Self-protection functions in direct light-triggered high-power thyristors // Microelectronics Journal. – 2001. – Vol. 32. – № 5–6. – P. 457–462.
4. **Baliga B.J.** Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – N.Y.: Springer, 2008. – 1069 p.
5. **Горячкин Ю.В.** Разработка моделей трехмерных элементарных ячеек мощного импульсного тиристора ТИ183-2000 в Synopsys TCAD // Электроника и информационные технологии. – 2012. – Вып. 1 (12). – URL: <http://fetmag.mrsu.ru/> (дата обращения 10.05.2016).

Статья поступила  
после доработки 22 июня 2016 г.

**Силкин Денис Сергеевич** – аспирант кафедры электроники и наноэлектроники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия. *Область научных интересов:* моделирование силовых электронных приборов. **E-mail:** [d-s.silkin@mail.ru](mailto:d-s.silkin@mail.ru)

**Падеров Виктор Петрович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и наноэлектроники Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия. *Область научных интересов:* проектирование интегральных микросхем; физика полу-проводниковых структур.