

## Особенности работы ограничителя напряжения в импульсном режиме

© А.З. Рахматов\*, О.А. Абдулхаев, А.В. Каримов<sup>†</sup>, Д.М. Ёдгорова

Физико-технический институт Научно-производственного объединения „Физика–Солнце“  
Академии наук Республики Узбекистан,  
100084 Ташкент, Узбекистан

\* ОАО „Foton“,  
1000084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 30 января 2012 г. Принята к печати 23 марта 2012 г.)

Экспериментально показано, что выдерживаемая импульсная мощность ограничителей напряжения независимо от номинальной мощности уменьшается по одному и тому же закону с увеличением длительности импульса, что свидетельствует об оптимальности их конструктивных параметров. Показана взаимосвязь между переходными временами (включения и выключения) и характеристическими параметрами структуры ограничителя напряжения. Возможность излучения части мощности на резонансной частоте является дополнительным стимулом для повышения выдерживаемой мощности.

### 1. Введение

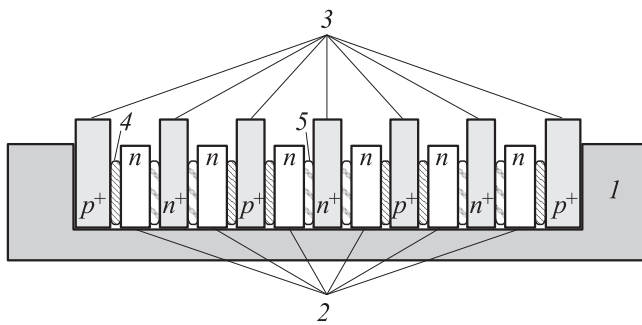
В полупроводниковых транзисторных, диодных или тиристорных структурах, используемых в системах передачи и обработки информации, создается емкостной ток, который, если не принять меры, может привести к ухудшению помехоустойчивости и надежности характеристик электронной схемы. Как показано в работе [1], емкостной ток увеличивает длительность перехода выходного напряжения  $V_{out}$  в состояние высокого уровня и увеличивает время рассасывания носителей. Применительно к биполярным транзисторам емкостной ток является следствием увеличения выходной емкости транзистора (эффекта Миллера) при его выключении из-за наличия положительной обратной связи. Для подавления его влияния авторами работы [2] предлагается создать низкоомную цепь отвода емкостного тока  $I_C$  вместо традиционного резистора с помощью ограничителя напряжения. Преимущество ограничителя напряжения — это очень низкое сопротивление в режиме включения и высокий частотный диапазон. Однако эти параметры отличаются друг от друга в зависимости от технологии и конструкции конкретного ограничителя напряжения. Чем меньше время подъема выходного напряжения и меньше время рассасывания носителей, тем больше частотный диапазон и шире область применения ограничителя напряжения [3].

В работе приводятся результаты исследования в импульсном режиме выдерживаемой мощности и времени включения ограничителя напряжения на основе кремниевой  $p^+ - n - n^+$ -структуры, полученной по новому, так называемому „пакетному“ способу [4] с одновременной двухсторонней диффузией бора и фосфора из твердой фазы.

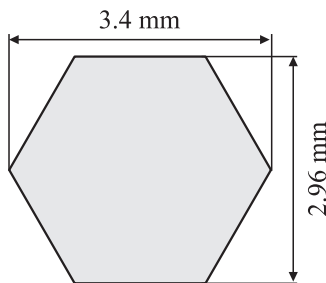
### 2. Исследуемые ограничители напряжения

Исследуемые диоды на основе кремниевой  $p^+ - n - n^+$ -структуры изготовлены с помощью диффузионной технологии, разработанной в ОАО „Foton“. В качестве базовой области выбран кремний  $n$ -типа проводимости марки КЭФ с исходной толщиной 200 мкм и удельным сопротивлением 0.02 Ом·см. Процесс диффузии проводили „пакетным“ способом [4]. „Пакетный“ способ отличается тем, что процесс диффузии проводится сразу на нескольких образцах, помещаемых в кварцевую кассету. На поверхности исходных кристаллов с определенным удельным сопротивлением, например, 0.02 Ом·см, шлифовкой создается микрорельеф для улучшения адгезии с диффузантом. Диффузант — КБК-45 (с 45%-м содержанием борной кислоты), создающий с исходным кристаллом  $p - n$ -переход, на поверхность кристалла наносится дважды, а второй диффузант — КФК-54 (с 54%-м содержанием фосфорной кислоты) наносится одним слоем. Для создания условий бесконечного источника между исходными кристаллами располагаются матированные корундом прокладки диаметром 800 мкм толщиной 1 мм  $n^+$ - и  $p^+$ -типа проводимости. Исходные кристаллы устанавливались в кассеты таким образом, чтобы прокладки оказались заключенными между одноименными сторонами, как показано на рис. 1. Сам процесс диффузии проводится в камере печи СДО 125/13-15. Температурный режим процесса диффузии включает нагрев системы со скоростью 5°C/мин от 650 до 1250°C в среде азота, выдержку при 1250°C в течение 48 ч и затем последующее охлаждение от 1250 до 650°C со скоростью 5°C/мин в среде сухого кислорода. Использование „пакетного“ способа диффузии примесей бора и фосфора в кремний позволило снизить поверхностное сопротивление  $p^+$ -слоя до 1.1–1.2 Ом/квadrat, а  $n^+$ -слоя до 0.3–0.4 Ом/квadrat. Характерным для предлагаемого способа является то, что в начальном участке (до 25 мкм) получают близ-

<sup>†</sup> E-mail: karimov@uzsci.net



**Рис. 1.** Схема расположения компонентов для проведения диффузии: 1 — кварцевая кассета, 2 — базовые кристаллы, 3 — прокладки, 4 — диффузаны  $p^+$ -типа и 5 — диффузаны  $n^+$ -типа.



**Рис. 2.** Сечение кристалла кремниевого ограничителя напряжения.

кие к поверхностному удельные сопротивления, которые затем сравнительно резко увеличиваются на 3–4 порядка, обеспечивая создание резкого  $p-n$ -перехода. Значение коэффициента диффузии, определенное как из бесконечного источника, составляет  $7.47 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$ , что одного порядка с приведенными в литературе. Глубина диффузии бора в кремний увеличивается сублинейно от времени диффузии и при 48 ч достигает до 50–70 мкм. Аналогичная зависимость одновременно имеет место и со стороны диффузии фосфора. В частности, толщины диффузионных областей с одной стороны,  $p^+$ -типа, порядка 60 мкм, а с другой,  $n^+$ -типа, — 70 мкм.

Распределение удельного сопротивления по толщине базовой области и глубину залегания  $p-n$ -перехода определяли на косом шлифе и сколе.

Следует отметить, что ион OH в рабочем режиме при перенапряжениях выделяет тепло, которое необходимо отводить из базовой области. С учетом низкой скорости термо- и электродиффузии, а также низкой проникающей способности в кремний в качестве контактного материала к полученным  $p^+-n-n^+$ -структурам были выбраны V-Ag, Ti-Ni-Au, где Ag и Au обеспечивают требуемые условия пайки. Контактные материалы напылялись последовательно с толщинами 0.1–0.65 мкм. Далее на их поверхности гальванически наносились относительно толстые  $\sim 5$  мкм слои Ag, а площади  $p^+-n-n^+$ -структур имеют шестигранную форму с пло-

щадью  $0.0742 \text{ см}^2$  (рис. 2). Затем на обеих поверхностях были сформированы тепловые компенсаторы сплавлением с помощью серебряного припоя толщиной 2–3 мкм. Тепловые компенсаторы выполнены из медного диска толщиной 380 мкм и диаметром 0.33 см, на обе поверхности которых нанесены коваровые слои толщиной 10 мкм.

Подготовленные таким образом структуры устанавливались в пластмассовые корпуса с металлическими выводами, припаянными с помощью мягкого припоя типа ПСР-2.5 на основе свинца с некоторым содержанием серебра с температурой плавления не выше  $400^\circ\text{C}$ . На основе вышеизложенной технологии были изготовлены образцы ограничителей напряжения с различным удельным сопротивлением базовой области и напряжениями пробоя от 12 до 340 В.

### 3. Результаты измерений и их обсуждение

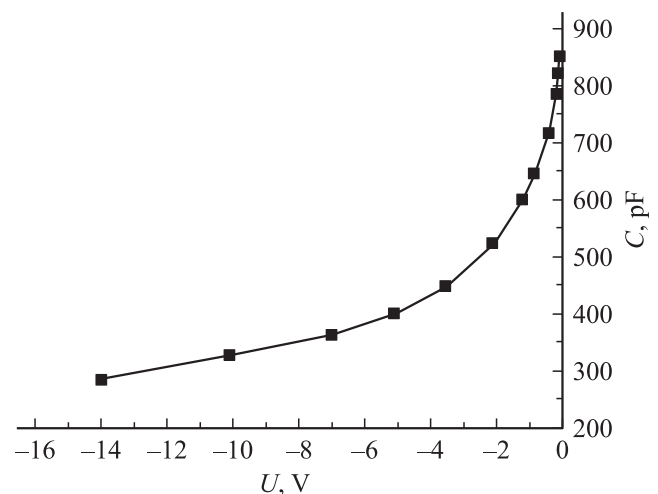
На основе полученных структур были проведены исследования вольт-емкостных и токовых зависимостей, а также зависимости максимальной импульсной мощности от длительности импульса.

Как показано на рис. 3, зависимость барьерной емкости  $p^+-n-n^+$ -структуры от запирающего напряжения подчиняется степенному закону  $1/C^2 \propto U$ , характерному для резкого перехода. Толщина слоя объемного заряда  $p^+-n$ -перехода, определенная на основе данных барьерной емкости в указанном интервале напряжений:

$$W_{p-n} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C_V}, \quad (1)$$

дает значение 0.09914 мкм при нулевом смещении и 0.27 мкм при напряжении 14 В.

Распределение концентрации носителей на границах обедненного слоя, определенное по формуле из рабо-



**Рис. 3.** Зависимость барьерной емкости от запирающего напряжения.

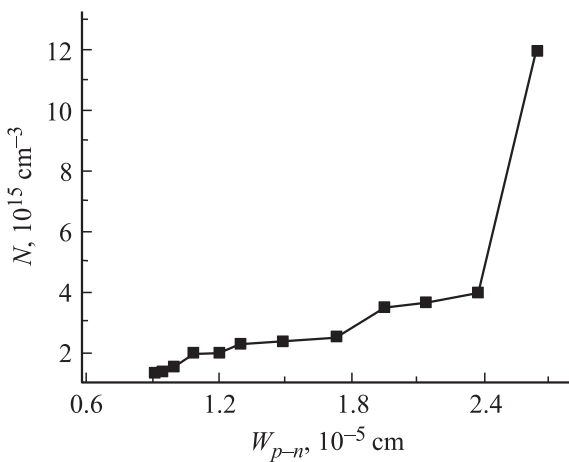


Рис. 4. Распределение концентрации носителей от границы  $p^+ - n$ -перехода.

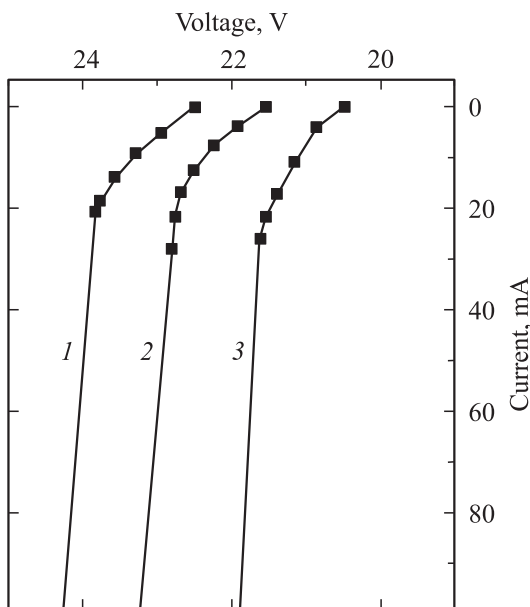


Рис. 5. Зависимость обратного тока от напряжения кремниевой  $p^+ - n - n^+$ -структуры при различных температурах, °C: 1 —  $125 \pm 2$ , 2 —  $25 \pm 2$ , 3 —  $-60 \pm 2$ .

ты [5], которая справедлива для любого распределения плотности заряда при малых приращениях напряжения смещения,

$$N_n(W_{p-n}) = -(2/(qS^2\epsilon\epsilon_0))(dC^{-2}/dV)^{-1}, \quad (2)$$

дает значение  $1.3 \cdot 10^{15} - 1.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (рис. 4).

- Таким образом, структура разбивается на четыре слоя:
- диффузионный слой  $p^+$ ,  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ;
  - частично компенсированный слой  $n^0$ ,  $1.3 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ;
  - исходный материал  $n$  с удельным сопротивлением  $0.02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ;
  - диффузионный слой  $n^+$ ,  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

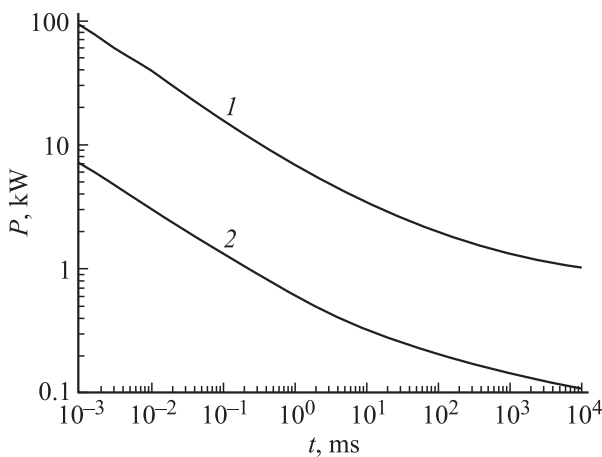
Вольт-амперные характеристики  $p^+ - n - n^+$ -структур, снятые на заводском стенде путем задания обратного тока и фиксации напряжения, позволили предотвратить переход на режим резкого роста обратного тока. Исследования вольт-амперных характеристик показали, что их пробивные напряжения с повышением температуры от  $-60 \pm 2^\circ\text{C}$  до  $125 \pm 2^\circ\text{C}$  увеличиваются (рис. 5), что характерно для лавинного пробоя. При этом для наблюдаемого напряжения пробоя 23 В напряженность электрического поля составляет порядка  $8.5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ .

В режиме лавинного пробоя образовавшийся лавинный ударный фронт, пронесшийся через диод, оставляет заполненную плазму со слабым электрическим полем. При этом ток, текущий через диод, существенно увеличивается из-за дополнительного размножения носителей в базе, а образуемая плазма снижает напряжение на диоде почти до нуля. Далее дырки из области базы дрейфуют к  $p^+$ -области, а электроны к  $n^+$ -области со скоростью, значительно меньшей, чем дрейфовая скорость насыщения, плазма постепенно рассасывается, сохраняя ток неизменным, и процесс повторяется. Процесс размножения носителей характеризуется высоким значением напряженности поля в диоде и предшествует новому образованию лавинного ударного фронта, который имеет наибольшую длительность [6]. В этом режиме, чем больше будет длительность импульса, тем выше будет температура и меньше будет выдерживаемая мощность.

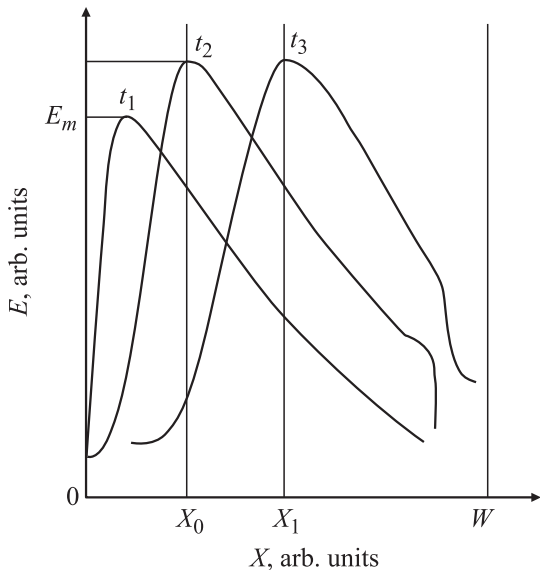
Действительно, как показали исследования зависимости максимальной импульсной мощности от длительности импульса (рис. 6), выдерживаемые мощности уменьшаются по мере увеличения длительности импульса. Ход зависимости выдерживаемой мощности от длительности импульса одинаков и для ограничителей напряжения 0.5 кВт выдерживаемая мощность почти на порядок меньше по сравнению с ограничителем напряжения 1.5 кВт, т.е. тепловые процессы подчиняются одному и тому же закону. В частности, по мере увеличения длительности импульса время включенного состояния будет увеличиваться, приводя к уменьшению времени отвода тепла и повышению температуры ограничителя. В результате по мере увеличения длительности импульса при меньшей мощности будет достигаться предельная температура.

Так как крутизна роста обратного тока в режиме пробоя является резкой, а приращение напряжения очень маленьким, время включения тоже будет очень маленьким (частотный диапазон высоким), что можно показать на основе аналитических расчетов.

При подаче резко растущего импульса обратного тока на ограничительный диод через него будет протекать емкостной ток до достижения напряжения пробоя. В структурах с  $p - n$ -переходом основным условием существования индуктивности являются наличие падения напряжения в высокоомной области, а также инжекция неосновных носителей в эту область, приводящая к



**Рис. 6.** Зависимость максимальной импульсной мощности от длительности импульса в ограничителях напряжения для мощности, кВт: 1 — 1.5, 2 — 0.5.



**Рис. 7.** Распространение ударной волны в области p-n перехода.

увеличению ее проводимости. Коэффициент пропорциональности между напряжением и скоростью изменения емкостного тока  $dI/dt$  представляет собой индуктивность  $L$ . Величина тока пропорциональна барьерной емкости и скорости изменения напряжения, что также связано с последовательным сопротивлением базы, и электрическое поле во всех сечениях будет возрастать со скоростью

$$\frac{dE}{dt} = \frac{j(t)}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (3)$$

Такой рост поля будет продолжаться до тех пор, пока электрическое поле в какой-то точке не достигнет максимального значения  $E_m$ . Когда поле превысит это значение, образуется лавинный ударный фронт, проносющийся через диод, который оставляет заполненную

плазму со слабым электрическим полем. Нарастание тока происходит настолько быстро, что процессом дрейфа носителей можно пренебречь. Сечение, где поле достигает максимума ( $E > E_m$ ), быстро перемещается в направлении к  $n^+$ -области, в котором распространяется ударная волна (рис. 7). Наклон поля справа от сечения  $X_0$  определяется выражением

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} N_b, \quad (4)$$

где  $N_b$  — концентрация примеси в обедненной области. Скорость распространения ударной волны получим делением уравнения (3) на (4), в результате чего имеем

$$v_{sw} = \frac{dx}{dt} = \frac{j(t)}{qN_b}. \quad (5)$$

Максимальная скорость носителей  $v_s \ll v_{sw}$ , но даже при условии  $v_s < v_{sw}$  генерированная плазма не будет успевать рассеиваться, вследствие чего будет развиваться ударная волна.

Полученные соотношения позволяют рассчитать полное время включения ограничительного диода  $t_{on}$ . Оно будет складываться из времени, необходимого для заряда барьерной емкости p-n-перехода  $t_{RC}$  от напряжения  $V_m$  до  $V_b$  с начальным током  $I = j \cdot S$ , где  $S$  — площадь p-n-перехода,

$$t_{RC} = \frac{C_b(V_b - V_m)}{I} = \gamma \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{W} \frac{E_m W}{2} \frac{1}{jS} = \gamma \frac{\epsilon\epsilon_0 E_m}{j}, \quad (6)$$

$C_b$  — емкость p-n-перехода,  $C_b = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{W}$ ,  $\gamma = \frac{V_m}{V_b} \approx 0.01$ , и времени распространения ударной волны

$$t_{sw} = \frac{W}{2v_{sw}} = \frac{qWN_b}{2j}. \quad (7)$$

К этим составляющим необходимо добавить время релаксации энергии  $t_e \approx 10^{-12}$  с, т. е. время, необходимое для перехода энергии от носителей к решетке.

Соответственно полное время включения ограничительного диода будет определяться выражением

$$t_{on} = \gamma \frac{\epsilon\epsilon_0 E_m}{j} + \frac{qWN_b}{2j} + t_e. \quad (8)$$

Как видно из этого выражения, после возникновения ударной волны динамика диода в значительной степени определяется схемой включения, которая определяет плотность тока  $j$ . После воздействия импульса тока происходит выключение диода. Это время определяется временем рассасывания возникшей в обедненной области плазмы.

Отличие исследуемых диодов состоит в том, что рост тока происходит с низким коэффициентом ограничения (1.13 против 1.183) по сравнению с известными аналогами [7], а плотность тока является очень высокой, располагая ограничитель напряжения в соответствии с формулой (8) к низким значениям времени включения.

Для экспериментальных данных  $\gamma \approx 0.01$ ,  $E = 8.5 \cdot 10^5$  В/см,  $W_{p-n} = 0.27$  мкм и плотности тока ( $100$  мА/ $0.0742$  см<sup>2</sup>) =  $1.347 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> время включения  $t_{on}$ , согласно (8), равно 13 мкс.

Исследуемую структуру можно представить в виде эквивалентной схемы, содержащей диффузионную емкость и сопротивление  $p^+ - n$ -перехода, индуктивность и последовательное сопротивление. Поскольку исследуемая  $p^+ - n - n^+$ -структура обладает индуктивностью [8], а процесс ударной ионизации приводит к сдвигу фаз между током проводимости и электрическим полем, открывается возможность получения электромагнитных колебаний и излучения части мощности на резонансной частоте. Это обстоятельство приводит к дополнительному повышению выдерживаемой мощности. Поскольку индуктивность структуры достаточно мала, частота будет очень высокой.

#### 4. Заключение

Экспериментально показано, что выдерживаемая импульсная мощность ограничителей напряжения независимо от номинальной мощности уменьшается по одному и тому же закону с увеличением длительности импульса, что свидетельствует об оптимальности их конструктивных параметров. Показана взаимосвязь между переходными временами (включения и выключения) и характеристическими параметрами структуры ограничителя напряжения. Возможность излучения части мощности на резонансной частоте является дополнительным стимулом для повышения выдерживаемой мощности.

#### Список литературы

- [1] А.И. Белоус, А.В. Силин, В.Н. Пономарь. *Схемотехника биполярных микросхем для высокопроизводительных систем обработки информации* (Минск, Тарпей, 1998) с. 154.
- [2] А. Белоус, В. Солодуха, В. Сокол, В. Сякерский. Электронные компоненты, **9**, 50 (2009). [<http://www.elcompjournal.ru>]
- [3] Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский, В.И. Кульгачев, Л.П. Ануфриев, И.И. Рубцевич, В.В. Глухманчук, Н.Ф. Голубев. ФТТ, **47** (1), 419 (2005).
- [4] А.Ф. Муратов, А.З. Рахматов, А.А. Меркулов, И.Р. Исмоилов. Патент РУз №5328. [Офиц. бюл., № 3 от 30.09.1994 г.].
- [5] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы* (М., Энергоатомиздат, 1987).
- [6] В.А. Козлов, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.И. Брылевский. ФТП, **35** (5), 629 (2001).
- [7] С. Скорняков, В. Павлов, А. Рахматов. Компоненты и технологии, **3**, 70 (2008).
- [8] S.M. Sze, K.Ng. Kwok. *Physics of Semiconductor Devices* (Hoboken–New Jersey, Wiley-Interscience, 2007) 3rd edn, p. 447.

Редактор Л.В. Беляков

#### Features of the transient voltage suppressor performance in the pulsed mode

A.Z. Rahmatov\*, O.A. Abdulkhaev, A.V. Karimov, D.M. Yodgorova

Physical-Technical Institute of the Scientific Association „Physics-Sun“, Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, 100084 Tashkent, Uzbekistan

\* OAO „Foton“, 100084 Tashkent, Uzbekistan

**Abstract** Shown experimentally that the impulse withstand power of the transient voltage suppressors regardless of power rating is reduced by the same law with increasing pulse duration, indicating that they have optimal design parameters. The interrelation between the transition times (when turned on and off) and the characteristic parameters of the transient voltage suppressor's structure is shown. The possibility of radiation of the part of the power at the resonant frequency is an additional incentive to improve the withstand power.