

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF REPORTS

УДК 621.382.2

### Исследование влияния электронного облучения на импульсную электрическую прочность диодов

*А.Б. Александрова, И.А. Харитонов*

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

### Study of Electron Irradiation Effect on Electrical Impulse

*A.V. Aleksandrova, I.A. Kharitonov*

*National Research University Higher School of Economics*

Исследовано влияние электронного облучения на параметры полупроводниковых диодов при прохождении одиночного импульса тока. Приведены результаты расчетов и экспериментальных исследований влияния электронного облучения на импульсную электрическую прочность. Показано, что при увеличении длительности импульса уменьшение амплитуды импульса тока, необходимого для достижения критической температуры, происходит за счет увеличения теплового сопротивления.

*Ключевые слова:* диод; импульс тока; импульсная электрическая прочность; критическая температура; электронное облучение; тепловое сопротивление.

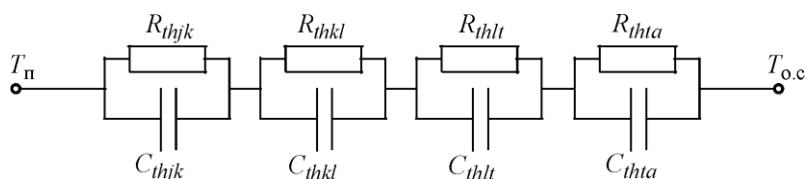
The effect of electron irradiation on parameters of semiconductor diodes with a single current pulse passage has been studied. The results of the calculations and experimental studies of the electron irradiation effect on the electrical impulse strength have been presented. It has been shown that with the pulse width increase the decrease of the pulse amplitude value of the current, required to reach the critical temperature, occurs due to the thermal resistance increase.

*Keywords:* diode; current pulse; pulse strength; the critical temperature; thermal resistance; electron irradiation; thermal resistance.

При эксплуатации электронного оборудования в электрических сетях могут возникать электрические перегрузки, вызванные грозовыми разрядами или коммутационными процессами. При прохождении одиночного импульса тока  $T_{\text{имп}}$  (ОИТ) через  $p-n$ -переход выделяется импульсная мощность в его локализованной области, которая приводит к перегреву  $p-n$ -перехода. В результате температура в  $p-n$ -переходе достигает критической  $T_{\text{кр}}$  и может произойти плавление кремния и, как следствие, разрушение структуры диода. Значение импульсной мощности  $P_{\text{имп}}$  при этих процессах определяется напряжением пробоя  $U_{\text{проб}}$ , ОИТ и сопротивлением базы  $R_6$  диода. Экспериментальное определение температуры  $p-n$ -перехода в момент прохождения ОИТ является сложным и дорогостоящим. Поэтому для оценки перегрева используются методы моделирования тепловых процессов. Электронное облучение (ЭО) применяется при произ-

водстве полупроводниковых приборов для уменьшения времени жизни носителей. После воздействия ЭО изменяется напряжение пробоя и сопротивление базы. Поэтому исследование изменения импульсной электрической прочности после ЭО представляет научный и практический интерес.

Согласно работам [1–3] тепловую модель диода можно представить как тепловое сопротивление  $R_{thja}$  от  $p-n$ -перехода до окружающей среды, которое можно разложить на составляющие (рисунок). Для учета емкостных составляющих используют переходное тепловое сопротивление  $Z(t)$ , рассчитываемое для многослойной структуры диода с помощью схемы Фостера [2]. Для расчета тепловых сопротивлений  $R_{thi}$  применяется методика, представленная в работе [4].



Тепловая модель диода:  $R_{thjk}$  – тепловое сопротивление  $p-n$ -переход – кристалл;  $R_{thkl}$  – тепловое сопротивление кристалл – алюминий;  $R_{thlt}$  – тепловое сопротивление алюминий – теплоотвод;  $R_{thta}$  – тепловое сопротивление теплоотвод – окружающая среда;  $C_{thjk}$  – тепловая емкость  $p-n$ -переход – кристалл;  $C_{thkl}$  – тепловая емкость кристалл – алюминий;  $C_{thlt}$  – тепловая емкость алюминий – теплоотвод;  $C_{thta}$  – тепловая емкость теплоотвод – окружающая среда;  $T_p$ ,  $T_{o.c}$  – температура  $p-n$ -перехода и окружающей среды соответственно

Напряжение пробоя  $U_{проб}$  пропорционально градиенту концентрации примеси в степени 0,4 [5]. При воздействии ЭО с флюенсом  $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$  увеличение  $U_{проб}$  составило 2 В. Изменение эффективной концентрации  $N_b$  типозадающей примеси в базе диода от интегрального потока  $\Phi$  [6] приводит к уменьшению сопротивления базы  $R_b$ .

Оценка увеличения напряжения лавинного пробоя в кремнии в зависимости от температуры проведена в работе [7]. При прохождении ОИТ выделение тепловой энергии в области  $p-n$ -перехода приводит к увеличению напряжения пробоя. Для температур от 450 до 500 °С отношение  $U_{проб}/U_{проб300}$  составляет не более 1,3.

Значение переходного теплового сопротивления  $Z(t)$  для длительности импульса 2 мс составляет 0,045 К/Вт, для длительности импульса 5 мс – 0,055 К/Вт. Критическая температура  $T_{кр}$  за время прохождения рассчитывается по формуле

$$T_{кр} = Z(t)I_{имп}(U_{проб} + I_{имп}R_b) + T_{o.c}.$$

Значение  $T_{кр}$ , приводящее к выходу диода из строя, принимаем равным 570°С. Расчет значений ОИТ, необходимых для достижения  $T_{кр}$ , дал следующие результаты: для длительности импульса 2 мс ОИТ достигает значения 53 А, для длительности импульса 5 мс ОИТ равен 45 А. Для диодов после ЭО с флюенсом  $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ : для длительности импульса 2 мс ОИТ составляет 48 А, а для длительности импульса 5 мс – 45 А.

Для экспериментального исследования выбраны диоды с кремниевой  $p^+-n-n^+$ -структурой, облученные электронами с энергией  $E_e = 10 \text{ МэВ}$ , и флюенсом  $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Исследование на воздействие ОИТ проводилось до и после ЭО (выборка 40 штук) для длительности импульса 2 и 5 мс. На диоды подавались ОИТ с увеличивающейся амплитудой до выхода диода из строя. Результаты расчетов и усредненные результаты измерений основных параметров диодов приведены в таблице.

Из таблицы видно, что результаты измерений подтверждают результаты расчетов. Для больших длительностей импульса значение теплового сопротивления больше, поэтому при достижении  $T_{кр}$  требуется меньшая амплитуда ОИТ. Отношения амплитуды ОИТ и импульсной мощности до и после ЭО составляют  $I_{имп0}/I_{имп} \approx 1,15$  и  $P_{имп0}/P_{имп} \approx 1,2$ .

Значения основных параметров диодов при прохождении ОИТ

Длительность импульса, мс	$Z(t)$ , К/Вт	Условия измерения	Расчет		Эксперимент	
			$R_b$ , Ом	$I_{имп}$ , А	$I_{имп}$ , А	$P_{имп}$ , кВт
2	0,045	До облучения	0,33	54	53	12
		После облучения	0,20	45	48	10
5	0,055	До облучения	0,33	47	45	10
		После облучения	0,20	45	43	9

Таким образом, при увеличении длительности импульса уменьшение амплитуды ОИТ, необходимого для достижения критической температуры, происходит за счет увеличения теплового сопротивления. Облучение электронами с энергией  $E_e = 10$  МэВ и флюенсом  $\Phi = 10^{16}$  см<sup>-2</sup> уменьшает значения ОИТ и импульсной мощности менее чем на 20%. ЭО не ухудшает импульсную электрическую прочность диодов и может использоваться при производстве диодов.

### Литература

1. **Ванин В.И.** Зависимость импульсной электрической прочности полупроводниковых приборов от длительности и формы одиночного импульса напряжения, воздействующего на них//ВАНТ: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2009. – № 2. – С. 23–27.
2. **Вяхирев В.** Измерение тепловых характеристик полупроводников электронных компонентов//Технология электронной промышленности. Сер. Микроэлектроника. – 2013. – № 3. – С. 90–92.
3. **Hensler A., Herold C., Lutz J., Thoben M.** Thermal impedance monitoring during power cycling tests // PCIM Europe (Nuremberg, Germany, 2011). – Nuremberg, 2011.
4. Влияние перегрева  $p-n$ -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов / **А.Е. Беляев, В.В. Басанец, Н.С. Болтовец и др.** // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 2. – С. 256–262.
5. **Коршунов Ф.П., Марченко И.Г., Жданович Н.Е.** Отжиг радиационных дефектов в электронно-облучаемых  $Mo/n-Si$ -структурах Шоттки // Материалы 9-й междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2011). – Минск, 2011.
6. **Вологдин Э.Н., Лысенко А.П.** Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов: учеб. пособие. – М.: МИЭМ, 1998. – 89 с.
7. **Лысенко А.П.** Пробой  $p-n$ -перехода и способы повышения пробивного напряжения: учеб. пособие. – М.: МИЭМ, 2011. – 62 с.

Поступило  
после доработки 16 декабря 2015 г.

**Александрова Анастасия Борисовна** – аспирант департамента электронной инженерии НИУ ВШЭ МИЭМ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов. **E-mail: frog\_x@mail.ru**

**Харитонов Игорь Анатольевич** – кандидат технических наук, профессор департамента электронной инженерии НИУ ВШЭ МИЭМ. *Область научных интересов:* моделирование полупроводниковых приборов.