

Моделирование зависимости ударного тока

от длительности и числа импульсов прямого тока, протекающего через силовой полупроводниковый прибор

В статье приводятся аналитические выражения, описывающие зависимость ударного тока от длительности и числа импульсов прямого тока, протекающего через силовой полупроводниковый прибор. Путем сравнения теоретических расчетов с результатами компьютерного моделирования проверена адекватность полученных выражений.

Сергей Матюхин, к. ф. – м. н.

sim1@mail.ru

Александр Ставцев

A.Stavtsev@proton-electrotex.com

Значение ударного тока является одной из важнейших характеристик силового полупроводникового прибора (СПП), определяющих его нагрузочную способность. Под ударным током обычно понимают максимальную амплитуду синусоидального импульса прямого тока, при пропуске которого через СПП без последующего приложения обратного напряжения определенные классификационные параметры прибора еще не выходят за пределы нормы. Пропускание через прибор тока большей амплитуды приводит к необратимому отказу в работе СПП и его разрушению вследствие перегрева.

Определение значения ударного тока в настоящее время проводится на основе расчета температуры структур СПП [1–3]. В свою очередь, эта температура определяется путем решения уравнения теплопроводности. При этом наибольшее распространение получили численные методы [1–4], так как аналитическое решение указанного уравнения требует использования ряда упрощающих предположений и не обеспечивает необходимой точности.

Следует отметить, что численные методы расчета ударных токов требуют определенных затрат машинного времени. Поэтому, как правило, подобного рода расчеты проводятся для одиночных импульсов тока фиксированной длительности. Обычно эта длительность равна 10 мс, что соответствует промышленной частоте тока 50 Гц. Увеличение числа импульсов прямого тока, протекающего через СПП, а также изменение их длительности приводит к экспоненциально быстрому росту времени счета, так как при численных расчетах ударных токов используются итерационные процедуры. В связи с этим поиск аналитических выражений, адекватно описывающих зависимость ударных токов от длительности и числа импульсов прямого тока, протекающего через СПП, не теряет своей актуальности.

В настоящей работе указанные выражения получены на основе термодинамического подхода к решению задачи о нагревании полупроводникового прибора. Адекватность полученных выражений проверена путем сравнения теоретических расчетов с результатами компьютерного моделирования.

Зависимость ударного тока от длительности одиночного импульса прямого тока, протекающего через силовой полупроводниковый прибор

Количество теплоты $Q_1(\tau)$, которое выделяется при пропуске через СПП одиночного импульса прямого тока длительностью τ , расходуется на нагревание прибора и частично рассеивается окружающей средой в результате его остывания. Поэтому

$$Q_1(\tau) = Q_T(\tau) + \Delta Q(\tau), \quad (1)$$

где $Q_T(\tau)$ — количество теплоты, выделение которого приводит к увеличению температуры СПП, а $\Delta Q(\tau)$ — количество теплоты, теряемое при остывании прибора во время прохождения импульса тока.

Уравнение (1) полностью определяет зависимость ударного тока от длительности одиночного импульса прямого тока произвольной формы. При этом трудности при получении явного вида этой зависимости связаны главным образом с тем, что электро- и теплофизические характеристики полупроводникового прибора в той или иной степени зависят от температуры, следовательно, по мере ее повышения будут изменяться с течением времени t .

Упростить полученную задачу позволяет учет того обстоятельства, что характерное время изменения температуры обычно больше длительности импульса τ . Так как процесс распространения тепла имеет диффузионный характер, скорость изменения тока,

как правило, больше скорости изменения температуры прибора. При этом его электро- и теплофизические параметры меняются медленнее тока, поэтому в первом приближении их значения можно считать постоянными, пропорциональными соответствующим значениям при исходной температуре прибора.

Будем в дальнейшем считать, что начальная температура СПП равна температуре T_0 окружающей среды, а после прохождения импульса тока в какой-либо точке прибора, например в его кремниевой структуре, достигается критическая температура T_C при которой прибор выходит из строя, т. е. амплитуда импульса тока равна значению ударного тока I_{TSM} для данного прибора. В этом случае количества теплоты $Q_T(\tau)$ и $\Delta Q(\tau)$ можно выразить через экспериментально измеряемые характеристики прибора — теплоемкость C_0 кремниевой структуры и тепловое сопротивление R_{th} :

$$Q_T(\tau) = \alpha C_0 \Delta T, \quad (2)$$

$$\Delta Q(\tau) = \beta (\Delta T / R_{th}) \tau, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_C - T_0$, а коэффициенты пропорциональности α и β представляют собой подгонные параметры модели.

При расчете теплоты $Q_1(\tau)$ учтем тот факт, что основная мощность при пропускании импульса тока выделяется на линейном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) СПП. Благодаря этому можно считать, что

$$Q_1(\tau) \approx \int_0^\tau [U_0 + RI(t)] I(t) dt, \quad (4)$$

где U_0 — напряжение отсечки линеаризованной ВАХ прибора, R — его дифференциальное сопротивление, $I(t)$ — сила протекающего через прибор тока.

Считая U_0 и R постоянными, для синусоидального импульса

$$I(t) = I_{TSM} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), \quad (5)$$

производя интегрирование (4), получаем:

$$Q_1(\tau) \approx \frac{2\gamma}{\pi} U_0 I_{TSM} \tau + \frac{1}{2} R I_{TSM}^2 \tau, \quad (6)$$

где γ — подгонный параметр модели.

Выражения (2, 3) и (6) с учетом равенства (1) приводят к следующей зависимости ударного тока от длительности импульса τ :

$$I_{TSM}(\tau) = \frac{2\gamma U_0}{\pi R} \times \left[\sqrt{\frac{\alpha \pi^2 R \Delta T}{2\gamma^2 U_0^2 R_{th}} \left(\frac{C_0 R_{th}}{\tau} + \frac{\beta}{\alpha} \right) + 1} - 1 \right]. \quad (7)$$

Полученное выражение показывает, что в области малых τ (при $\tau \ll C_0 R_{th}$)

$$I_{TSM}(\tau) \approx \sqrt{(2\alpha C_0 \Delta T) / (R\tau)}, \quad (8)$$

т. е. $I_{TSM}(\tau) \sim 1/\sqrt{\tau}$. Этот случай соответствует прохождению через прибор синусоидального импульса столь высокой частоты, что выде-

ляющееся при этом тепло не успевает отводиться от прибора: $\Delta Q(\tau) \approx 0$.

В области низкочастотных импульсов значение ударного тока стремится к постоянному пределу

$$I_{TSM}(\infty) \approx \sqrt{(2\beta \Delta T) / (R R_{th})}. \quad (9)$$

Это предельное значение тока соответствует ситуации, когда практически вся выделяющаяся при прохождении тока мощность рассеивается окружающей средой. Отметим, что формулы (8) и (9) позволяют определить параметры α и β .

Результаты теоретических расчетов, проведенных по формуле (7) для тиристора Т243-500 и диода ДЛ343-630-34, представлены на рис. 1 (сплошные кривые). Сравнение этих результатов с результатами компьютерного моделирования, основанного на численном решении уравнения теплопроводности (маркеры на рис. 1), свидетельствует об удовлетворительном согласии развитой теории с данными машинного эксперимента.

Отклонение теоретических результатов, полученных для Т243-500, от данных компьютерного моделирования в области малых τ объясняется тем, что в случае тиристорov в области высоких частот существенное влияние на величину их ударного тока оказывают процессы их включения [1–3], которые не рассматривались в настоящей работе.

В ходе теоретических расчетов предполагалось, что параметры α , β и γ имеют одинаковое значение для обоих типов приборов. При этом оказалось, что и в том, и в другом случае теория удовлетворительно описывает результаты компьютерного моделирования при $\gamma = 0$, так как первым, линейным по току слагае-

мым в выражении (6) при больших значениях ударных токов можно пренебречь.

Теоретические кривые на рис. 1 соответствуют именно этому значению параметра γ .

Таким образом, для СПП с высоким значением ударного тока его зависимость от длительности одиночного импульса прямого тока с хорошей степенью точности описывается выражением

$$I_{TSM}(\tau) \approx \sqrt{\frac{2\alpha \Delta T}{R R_{th}} \left(\frac{C_0 R_{th}}{\tau} + \frac{\beta}{\alpha} \right)}. \quad (10)$$

Зависимость ударного тока от количества импульсов прямого тока, протекающего через силовой полупроводниковый прибор

В основу расчета зависимости ударного тока от числа N импульсов прямого тока, протекающего через СПП, может быть положено следующее рекуррентное соотношение:

$$NQ_1(N) = Q_1(1) + (N-1)\Delta Q_1(N), \quad (11)$$

где $Q_1(1)$ — это количество теплоты, которое должно выделяться при прохождении одиночного импульса тока, чтобы температура в месте пробоя СПП повысилась от начального значения T_0 до критического значения T_C ; $Q_1(N)$ — количество теплоты, которое должно выделяться при прохождении через прибор N импульсов; $\Delta Q_1(N)$ — количество теплоты, которое теряется при остывании прибора за время 2τ между двумя соседними импульсами тока. Используя те же предположения об электро- и теплофизических параметрах и ВАХ прибора, что

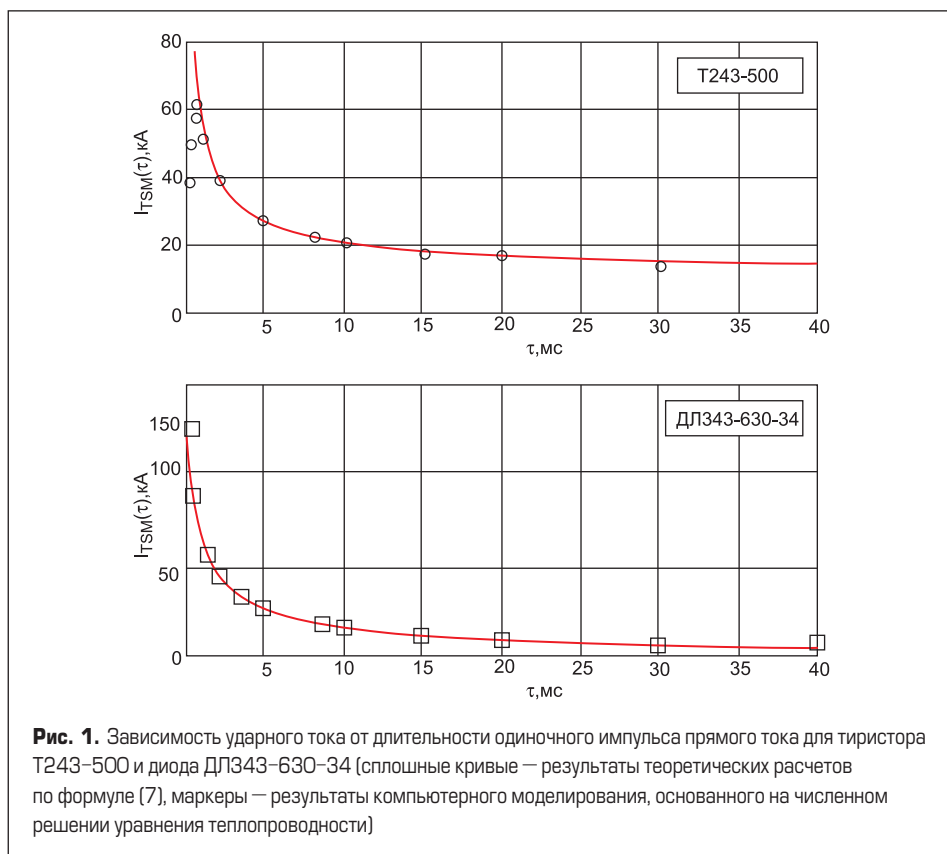


Рис. 1. Зависимость ударного тока от длительности одиночного импульса прямого тока для тиристора Т243-500 и диода ДЛ343-630-34 (сплошные кривые — результаты теоретических расчетов по формуле (7), маркеры — результаты компьютерного моделирования, основанного на численном решении уравнения теплопроводности)

и в предыдущем разделе, нетрудно догадаться, что в случае импульсов синусоидальной формы (5) величины $Q_1(1)$ и $Q_1(N)$ будут описываться выражениями, подобными формуле (6):

$$Q_1(N) \approx \frac{2\gamma}{\pi} U_0 \tau I_{TSM}(N) + \frac{1}{2} R \tau I_{TSM}^2(N), \quad (12)$$

$$Q_1(1) \approx \frac{2\gamma}{\pi} U_0 \tau I_{TSM}(1) + \frac{1}{2} R \tau I_{TSM}^2(1). \quad (13)$$

Отсюда, пренебрегая линейными по току слагаемыми, с учетом равенства (11) приходим к следующей зависимости ударного тока от числа импульсов прямого тока, протекающего через СПП:

$$I_{TSM}(N) \approx \sqrt{\frac{I_{TSM}^2(1)}{N} + \frac{2(N-1) \Delta Q_1(N)}{NR\tau}}, \quad (14)$$

где $I_{TSM}(1)$ — значение ударного тока для одиночного импульса, которое можно оценить по формуле (10).

Дальнейшее упрощение формулы (14) связано с поиском явного выражения для теплоты $\Delta Q_1(N)$, рассеиваемой окружающей средой за время между двумя соседними импульсами тока. Заранее очевидно, что эта величина будет связана с теми же теплофизическими характеристиками прибора, что и величина $\Delta Q(\tau)$, рассмотренная в предыдущем разделе:

$$\Delta Q_1(N) \sim (\Delta T / R_{th}) 2\tau. \quad (15)$$

Однако, помимо этого, теплота $\Delta Q_1(N)$ будет зависеть еще и от N , так как с увеличением количества импульсов тока при прохождении через прибор единичного импульса он будет нагреваться все слабее и слабее, а следовательно, отводимое от прибора количество теплоты, пропорциональное градиенту температуры, будет уменьшаться.

Естественно предположить, что зависимость $\Delta Q_1(N)$ имеет степенной вид:

$$\Delta Q_1(N) \sim 1/N^v, \quad (16)$$

где v — подгоночный параметр модели ($v > 0$). Тогда с учетом (15) приходим к следующему равенству:

$$\Delta Q_1(N) = \beta \frac{\Delta T}{R_{th} N^v} 2\tau, \quad (17)$$

где β — это коэффициент пропорциональности (подгоночный параметр модели), значение которого должно быть близко к значению β , используемому в предыдущем разделе.

С учетом равенства (17) для зависимости ударного тока от числа импульсов прямого тока, протекающего через СПП, окончательно получаем:

$$I_{TSM}(N) \approx \sqrt{\frac{I_{TSM}^2(1)}{N} + 4\beta \frac{(N-1) \Delta T}{N^{v+1} R_{th}}}. \quad (18)$$

Результаты теоретических расчетов, проведенных по формуле (18) для тиристора Т243-500 и диода ДЛ343-630-34 (сплошные кривые), и результаты компьютерного моделирования, основанного на численном решении уравнения теплопроводности (маркеры), представлены на рис. 2. Их сравнение свидетельствует об удовлетворительном согласии теории с данными моделирования.

При расчетах предполагалось, что параметры β и v имеют одинаковое значение для обоих типов приборов. Изображенные на рисунке кривые соответствуют значению $v = 0,38$.

Отметим, что формула (18) позволяет рассчитать «идеальную долговечность» прибора при прохождении через него синусоидальных импульсов прямого тока заданной длительности и амплитуды. Действительно, если считать внешние условия неизменными, то отказ прибора в этом случае будет связан с его постепенным нагреванием до критической температуры в результате кумулятивного эффекта. Считая, что амплитуда импульсов соответствует ударному току $I_{TSM}(N)$, воспользовавшись выражением (18), можно определить число N импульсов тока, которые пройдут через прибор, прежде чем он выйдет из строя. При этом, зная длительность импульсов τ , легко оценить время Δt_{max} , которое должно пройти до отказа в работе прибора: $\Delta t_{max} \approx 2\tau N$.

Эта задача особенно просто решается в том случае, если амплитуда I_{max} импульсов тока много меньше величины $I_{TSM}(1)$, определяемой выражением (7) или (10). В этом случае число N импульсов тока, которые пройдут через прибор, прежде чем он выйдет из строя, велико ($N \gg 1$), поэтому, учитывая, что $0 < v < 1$, на основе формулы (18) можно записать:

$$I_{max} \equiv I_{TSM}(N) \approx \sqrt{\frac{4\beta \Delta T}{N^v R_{th}}}. \quad (19)$$

Отсюда

$$N \approx \left(\frac{4\beta \Delta T}{I_{max}^2 R_{th}} \right)^{1/v}, \quad (20)$$

а «идеальная долговечность» прибора

$$\Delta t_{max} \approx 2\tau \times \left(\frac{4\beta \Delta T}{I_{max}^2 R_{th}} \right)^{1/v}. \quad (21)$$

Заключение

Полученные в настоящей работе результаты показывают, что существуют простые аналитические выражения, адекватно описывающие зависимость ударных токов от длительности и числа импульсов прямого тока, протекающего через СПП. Для всех типов приборов эти выражения имеют универсальный вид с коэффициентами, определяемыми значениями электро- и теплофизических характеристик конкретного прибора. Так, для СПП с большими значениями ударных токов их зависимость от длительности τ одиночного импульса определяется выражением:

$$I_{TSM}(\tau) \approx \sqrt{A/\tau + B}, \quad (22)$$

где

$$A = (2\alpha C_0 \Delta T)/(R), B = (2\beta \Delta T)/(R R_{th}). \quad (23)$$

Зависимость ударного тока этих приборов от числа импульсов имеет вид:

$$I_{TSM}(N) \approx \sqrt{\frac{I_{TSM}^2(1)}{N} + 2B \frac{(N-1)}{N^{v+1}}}, \quad (24)$$

где $0 \leq v \leq 1$, а $I_{TSM}(1)$ — значение (22) ударного тока для одиночного импульса.

Литература

1. Григоренко В. П., Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Мнацаканов Т. Т. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергоатомиздат. 1988.
2. Рабинерсон А. А., Ашкинази Г. А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия. 1976.
3. Бардин В. М. Надежность силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия. 1978.
4. Польский Б. С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. Рига: Зинатне. 1986.

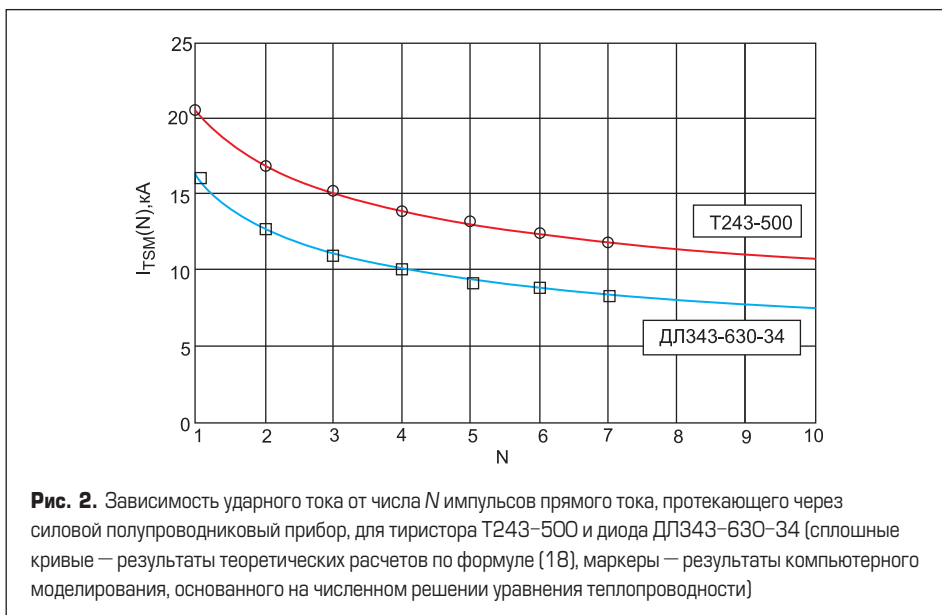


Рис. 2. Зависимость ударного тока от числа N импульсов прямого тока, протекающего через силовой полупроводниковый прибор, для тиристора Т243-500 и диода ДЛ343-630-34 (сплошные кривые — результаты теоретических расчетов по формуле (18), маркеры — результаты компьютерного моделирования, основанного на численном решении уравнения теплопроводности)