

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СОСТОЯНИИ НИЗКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С.

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,
Научно-производственное предприятие «Электронная техника – МГУ», г. Саранск
Тел. (834-2) 24-37-05. E-mail: eltech-mgu@mail.ru

Аннотация. В докладе рассматривается специфика контроля параметров силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости.

Ключевые слова. Силовой полупроводниковый прибор, вольт-амперная характеристика, напряжение, ток, погрешность, точность, ёмкостная и активная составляющие, испытательный импульс, стандарт, LabVIEW.

Summary. In the report the specificity of the control of parameters of power semi-conductor devices in a condition of low conductivity is considered.

Keywords. Power semiconductor device, conductivity, LabVIEW.

Постановка задачи

В настоящее время силовые полупроводниковые приборы (СПП) получили широкое распространение в самых различных областях электротехники и электроники. Надежность преобразователей на основе СПП, в качестве которых широко применяются силовые диоды и тиристоры, при эксплуатации определяется надёжностью составных элементов, в частности СПП.

Надёжность СПП, в свою очередь, определяется их исходным качеством и режимами эксплуатации. Некоторые величины этих параметров и характеристик разработчиками приборов приводятся в паспортных данных на тип СПП. Однако величины параметров и характеристик серийных СПП имеют значительный разброс, вызванный естественной нестабильностью технологии производства.

Отсутствие учёта разброса параметров и характеристик СПП в реальных режимах эксплуатации приводит к неэффективности подбора для группового соединения, что при определённых условиях эксплуатации приводит к повышению вероятности отказа отдельных приборов, ведущему к выходу из строя преобразователя в целом.

Параметрами критериями годности СПП являются повторяющиеся импульсные токи в закрытом (I_{DRM}) и обратном (I_{RRM}) состояниях. По значениям этих параметров определяются предельные значения, соответственно, повторяющихся импульсных напряжений в закрытом состоянии (U_{DRM}) и обратном состоянии (U_{RRM}), которые в свою очередь определяют класс СПП по напряжению. Важность объективной классификации СПП по напряжению определяется необходимостью обеспечения их надёжной работы в преобразователях электрической энергии в течение всего срока службы. Необъективное определение величины класса СПП ведёт либо к понижению их потенциальных возможностей, либо повышает вероятность их отказа при эксплуатации.

Особенности контроля параметров СПП в состоянии низкой проводимости

Для измерения указанных параметров критериев годности стандарт [1] требует использовать испытательный импульс напряжения $u_{D(R)}$ полусинусоидальной формы, амплитуда которого равна значению $U_{D(R)RM}$. Значения параметров I_{RRM} или I_{DRM} определяются в момент достижения импульса испытательного напряжения $u_{D(R)}$ амплитудного значения $U_{D(R)M}$, где скорость $du_{D(R)}/dt=0$. Температура полупроводниковой структуры испытуемого прибора (ИП) должна быть предельно допустимой с погрешностью установки ± 5 °С. Точность измерения параметров при этом определяется точностью установления $U_{D(R)M}$, точностью фиксации момента достижения амплитуды и быстродействием аналого-цифрового измерителя.

Данные требования стандарта [1] обязательны для изготовителей СПП. Однако потребители СПП, как правило, не оснащены аппаратурой, способной полностью обеспечить эти требования. В частности, требование нагрева ИП до предельно допустимой температуры вызывает, во-первых, необходимость создания специального нагревательного устройства, а, во-вторых, введение при входном и промежуточном контроле состояния СПП дополнительной операции, что экономически невыгодно.

Представляет интерес рассмотреть возможность контроля параметров критериев годности СПП при нормальной температуре 20–27 °С.

Для этого рассмотрим вольтамперную характеристику (ВАХ) $p-n$ перехода в состоянии низкой проводимости при воздействии на него испытательного напряжения полусинусоидальной формы длительностью 10 мс, рекомендованной стандартом [1].

Эквивалентная схема $p-n$ перехода в состоянии низкой проводимости представляет собой параллельное соединение нелинейной активной и ёмкостной составляющей со значительной барьерной ёмкостью C_b [2], которая зависит от прикладываемого напряжения. В связи с этим в испытательной цепи ИП при приложении к нему изменяющегося напряжения $u_{D(R)}$ протекают активная $i_{D(R)A}$ и ёмкостная $i_{D(R)C}$ составляющие суммарного тока $i_{D(R)\Sigma}$ (рис. 1), который обычно измеряется при испытании:

$$i_{D(R)\Sigma} = i_{D(R)A} + i_{D(R)C} . \quad (1)$$

Это обуславливает возникновение значительной дополнительной погрешности измерения значения $I_{D(R)RM}$, величина которого равна активной составляющей тока $I_{D(R)A}$ а, соответственно, и значения $U_{D(R)RM}$.

Известно [3], что активный ток состоит из суммы диффузионной и генерационной составляющих. В кремниевых структурах при рабочих температурах СПП не превышающих 140–200 °С, диффузионная составляющая тока намного меньше генерационной, поэтому под активным током в состоянии низкой проводимости понимается его генерационная составляющая:

$$I_R \approx \frac{qn_i W_{on}}{2\sqrt{\tau_p \tau_n}} S , \quad (2)$$

где q — элементарный заряд, равный абсолютному заряду электрона; n_i — концентрация собственных носителей полупроводника; W_{on} — толщина слоя объемного заряда в n -базе; S — площадь $p-n$ перехода; τ_p и τ_n — времена жизни электронов в p -области и дырок в n -области, соответственно.

Толщина слоя объемного заряда в n -базе при напряжениях значительно превышающих контактную разность потенциалов на $p-n$ переходе ($\varphi_K = 0,67$ В) зависит от величины обратного постоянного напряжения U_R [3]:

$$W_{on} \approx 0,52 \sqrt{\rho_n U_{D(R)}} , \quad (3)$$

где ρ_n — удельное сопротивление кремния в n -базе.

Таким образом, с учетом (3) ток через $p-n$ переход в состоянии низкой проводимости в статике описывается выражением:

$$I_R \approx 0,26 \frac{qn_i \sqrt{\rho_n U_{D(R)}}}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} S . \quad (4)$$

Как известно, p - n переход обладает подобно плоскому конденсатору ёмкостью. Эта ёмкость зависит от конструктивных размеров полупроводниковой структуры. Причем с ростом прикладываемого в обратном направлении напряжения к p - n переходу толщина слоя объемного заряда W_{on} увеличивается, а барьерная ёмкость C_{δ} при этом уменьшается. С учетом (3) величина барьерной ёмкости обратного смещенного p - n перехода определяется в виде:

$$C_{\delta} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{0,52 \sqrt{\rho_n U_{D(R)}}}, \quad (5)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость кремния; ε_0 — электрическая постоянная.

При испытании ИП импульсом полусинусоидальной формы помимо активной составляющей $i_{D(R)A}$ через барьерную ёмкость p - n перехода протекает ёмкостной ток $i_{D(R)C}$. Величина, которого определяется величиной барьерной ёмкости и скоростью изменения напряжения $du_{D(R)}/dt$ на ИП:

$$i_{D(R)C} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{0,52 \sqrt{\rho_n U_{D(R)}}} \cdot \frac{du_{D(R)}}{dt}. \quad (6)$$

Таким образом, при воздействии на p - n переход, переменного во времени напряжения, суммарный ток через ИП равен:

$$i_{D(R)\Sigma} = i_{D(R)A} + i_{D(R)C} = 0,26 \frac{qn \sqrt{\rho_n U_{D(R)}}}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} S + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{0,52 \sqrt{\rho_n U_{D(R)}}} \frac{du_{D(R)}}{dt}. \quad (7)$$

При испытательном обратном импульсе напряжения полусинусоидальной формы суммарный обратный ток через ИП в состоянии низкой проводимости определяется из соотношения:

$$i_{D(R)\Sigma} = 0,26 \frac{qn \sqrt{\rho_n U_m \sin \omega t}}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} S + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U_m \omega \cos \omega t}{0,52 \sqrt{\rho_n U_m \sin \omega t}} S, \quad (8)$$

где U_m — амплитуда напряжения; ω — круговая частота.

На основе зависимости (8) проведены исследования формы тока через СПП при воздействии на него импульсом напряжения полусинусоидальной формы амплитудой $U_m = 4$ кВ при температурах структуры 27°C и 125°C , а также построены ВАХ p - n перехода СПП в состоянии низкой проводимости (рис. 1) при условии $t > 0$. Для этого были использованы параметры тиристора Т273–1250 рассчитанного на напряжение $U_{D(R)M} = 5$ кВ, и имеющего диаметр полупроводниковой структуры 76 мм.

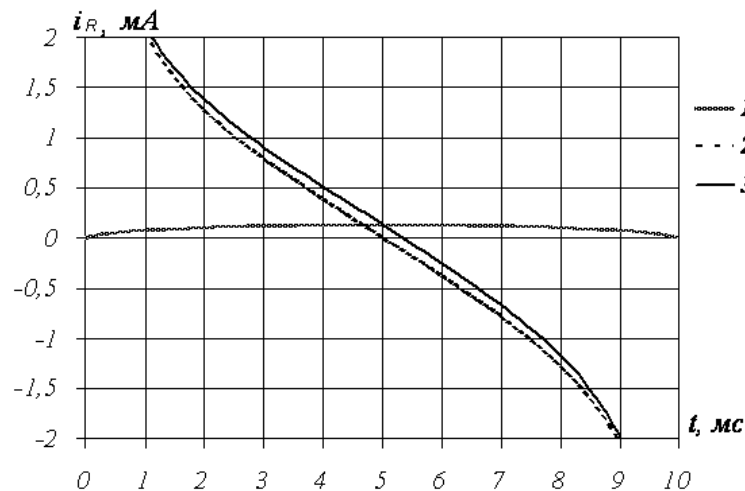


Рис. 1. Активная (кривая 1), ёмкостная составляющие обратного тока (кривая 2) и суммарный ток (кривая 3), протекающие через p - n переход при полусинусоидальной форме прикладываемого напряжения $u_{D(R)}$ и при температуре $T_j=27^{\circ}\text{C}$.

Из рис. 1 видно, что в начальный момент времени, когда скорость изменения напряжения $\frac{du_{D(R)}}{dt}$ наибольшая, а барьерная ёмкость p - n перехода, вследствие еще малой величины прикладываемого напряжения, максимальна, ёмкостной ток через ИП во много раз превышает ток генерации. При этом с уменьшением барьерной ёмкости, вследствие увеличения напряжения и уменьшения скорости изменения напряжения на ИП, ёмкостной ток снижается. В момент, когда скорость изменения напряжения равна нулю ($t = 5$ мс), ёмкостной ток также равен нулю. В последующий этап изменения напряжения на ИП, когда его производная становится отрицательной, ток через барьерную ёмкость p - n перехода протекает в обратном направлении.

Существенное значение на соотношение величин составляющих суммарного тока через ИП имеет температура полупроводниковой структуры. Активная составляющая тока с учётом температуры структуры определяется выражением [3]:

$$I_{D(R)}(T) = I_{D(R)0}(T_0) \exp \left[B \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right], \quad (9)$$

где $I_R(T_0)$ — ток при температуре структуры $T_0 = 27^{\circ}\text{C}$; $B \approx 23,6$ — для кремния.

С учетом (9) ток в состоянии низкой проводимости при воздействии на прибор, температура структуры которого отлична от 27°C , переменного во времени импульса напряжения определяется как:

$$i_{D(R)} = 0,26 \frac{qn \sqrt{\rho_n u_{D(R)}}}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} S \exp \left[B \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right] + \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{0,52 \sqrt{\rho_n u_{D(R)}}} \frac{du_{D(R)}}{dt}. \quad (10)$$

Применяя (10) для полусинусоидальной формы испытательного напряжения при $t > 0$ получим:

$$i_{D(R)} = 0,26 \frac{qn \sqrt{\rho_n u_{D(R)}}}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} S \exp \left[B \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right] + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U \omega \cos \omega t}{0,52 \sqrt{\rho_n u_{D(R)}} \sin \omega t} S. \quad (11)$$

На рис. 2 представлена ВАХ центрального p - n перехода тиристора Т273–1250, при температуре полупроводниковой структуры 27°C без учёта ёмкостного тока (кривая 1 — статическая ВАХ) и с его учётом (кривая 2 — динамическая ВАХ).

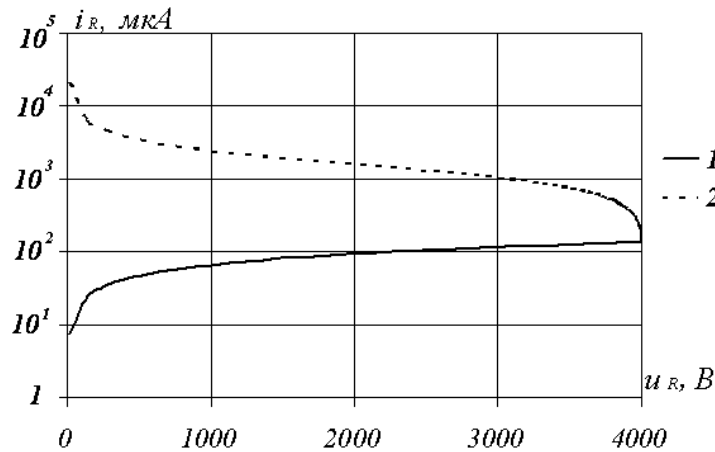


Рис. 2. Статическая (кривая 1) и динамическая (кривая 2) ВАХ p - n перехода тиристора Т273–1250 при температуре 27°C .

Из приведённого графика видно, что при прикладывании к ИП импульса обратного напряжения полусинусоидальной формы, статическая и динамическая ВАХ не совпадают, кроме того, при малых напряжениях и больших скоростях ёмкостной ток существенно превышает ток генерации.

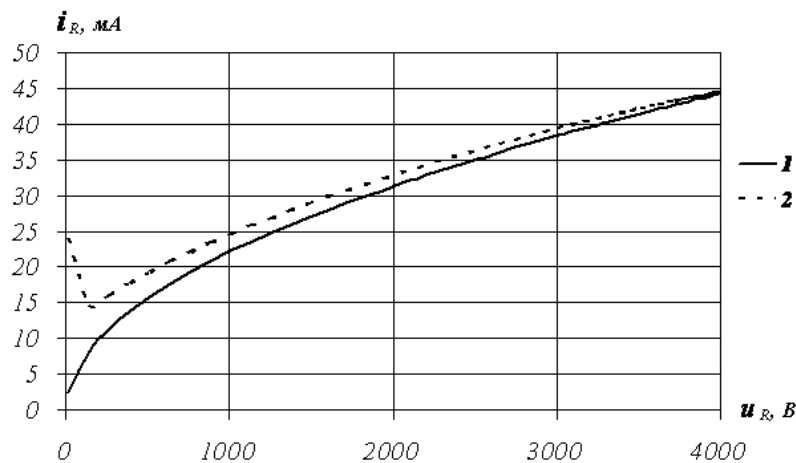


Рис. 3. Статическая (кривая 1) и динамическая (кривая 2) ВАХ p - n перехода тиристора Т273–1250 при температуре 125°C .

На рис. 3 приведены рассчитанные ВАХ того же прибора при температуре 125°C . Видно, что активная составляющая тока выросла на несколько порядков. На её фоне ёмкостная составляющая тока выражена слабее, чем при температуре 27°C . При низких значениях напряжения $u_{D(R)}$ ёмкостная составляющая оказывает существенное влияние на суммарный ток.

Относительная погрешность в состоянии низкой проводимости суммарной динамической составляющей тока, от активной статической генерационной составляющей тока определяется следующим образом:

$$\delta_i = \frac{i_{D(R)\Sigma} - i_{D(R)R}}{i_{D(R)R}} \cdot 100\% . \quad (12)$$

Результат оценки относительной погрешности определения тока через ИП в состоянии низкой проводимости в зависимости от прикладываемого напряжения представлен на рис. 4.

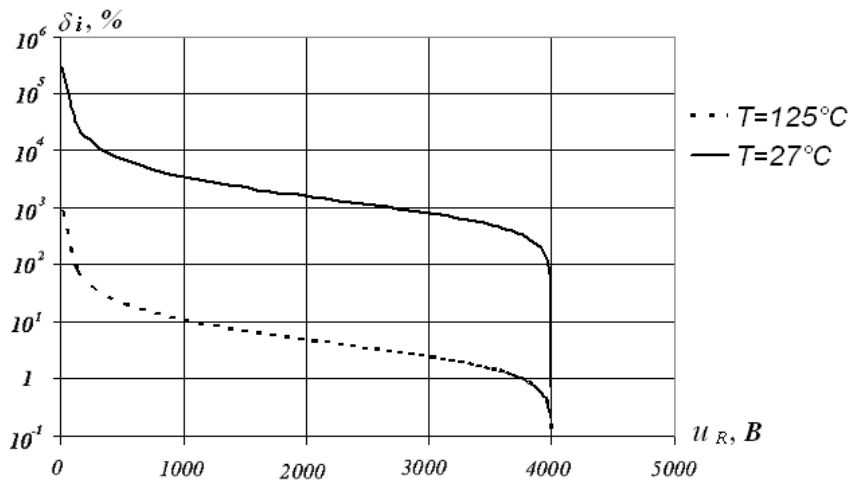


Рис. 4. Зависимости относительной погрешности δ_i от напряжения u_R при различных температурах полупроводниковой структуры.

Из рис. 4 видно, что по мере приближения напряжения $u_{D(R)}$ к амплитудному значению 4000 В относительная погрешность, уменьшаясь, стремится к нулю за счет уменьшения ёмкостной составляющей тока, причем только при амплитудном значении напряжения погрешность равна нулю при любых значения температуры полупроводниковой структуры.

Стандартом [1] установлен предел погрешности измерения параметров СПП $\pm 10\%$. Для тиристора Т273–1250 при температуре структуры $T_j = 125^\circ\text{C}$ эта зона наблюдается при значениях напряжения $u_{D(R)} > 1000$ В (рис. 4).

Для «холодной» структуры СПП ($T_j = 27^\circ\text{C}$) зона, где наблюдаются значения погрешности измерения тока $I_{D(R)RM}$ меньше предельной, близка к амплитудному значению. В связи с этим для объективного измерения тока $I_{D(R)RM}$ в «холодном» состоянии при испытании СПП требуется применять такую зависимость испытательного напряжения, при которой в момент измерения обеспечивается скорость изменения испытательного напряжения $du_{D(R)}/dt \approx 0$.

Таким образом, для определения основных критериев годности СПП в состоянии низкой проводимости, как при $T_j = 125^\circ\text{C}$, так и при $T_j = 27^\circ\text{C}$, на испытуемый прибор (ИП) необходимо подавать последовательность импульсов полусинусоидальной формы с нарастающей амплитудой. Измерение тока $I_{D(R)RM}$ производится при амплитудном значении U_{DRM} , это приводит к повышению точности и быстродействия измерительного оборудования.

Выбор и обоснование метода испытания

Определение вольтамперной характеристики (ВАХ) и класса СПП по напряжению в настоящее время затруднено отсутствием эффективных методик, обеспечивающих объективное определение основных критериев их годности в состоянии низкой проводимости — импульсных токов в закрытом (I_{DRM}) и обратном (I_{RRM}) состояниях. По значениям этих параметров определяются, соответственно, предельные значения

повторяющихся импульсных напряжений в закрытом состоянии (U_{DRM}) и обратном состоянии (U_{RRM}), которые, в свою очередь, и определяют класс СПП по напряжению.

Проверку класса, или определение повторяющегося напряжения U_{DRM} , проводят согласно действующему стандарту [1]. На рис. 5 представлены диаграммы последовательности импульсов напряжения, прикладываемого к ИП для определения класса, и тока, протекающего через ИП.

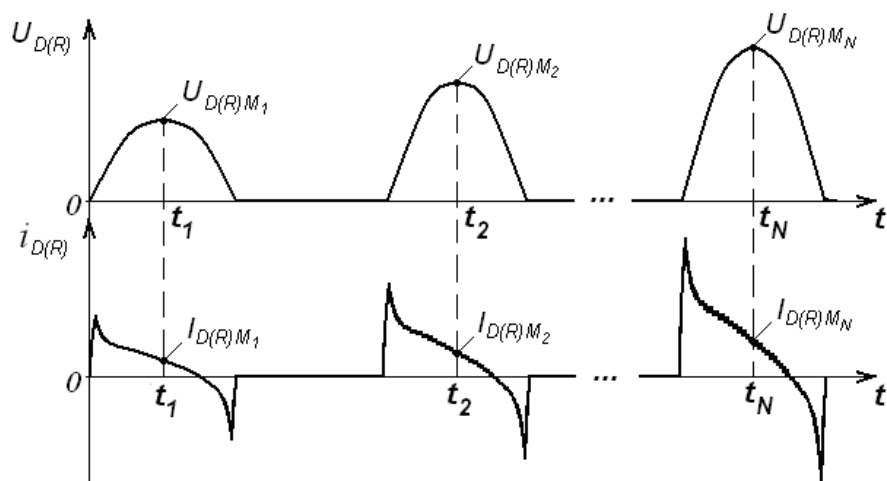


Рис. 5. Диаграммы импульсов напряжения на ИП, и тока через него в ходе испытаний.

Измерение текущей величины I_{DRM} осуществляется в момент, когда импульс напряжения достигает амплитуды, при которой скорость изменения напряжения $du_{D(R)}/dt \approx 0$. При достижении величины I_{DRM} установленной для испытуемого типа приборов классификационной повторяющейся величины тока I_{DRM} или при некотором ее превышении процесс увеличения амплитуды напряжения прекращается. При этом в зависимости от величины этой амплитуды напряжению присваивается определенный класс по напряжению, которая соответствует величина $U_{DRM}/100$. В случае, если полученная величина оказывается дробной, то класс вентиля определяется целым числом, меньшим из двух соседних целых чисел, между которыми лежит искомое дробное число. Подобная градуировка производится, если класс вентиля более 3. При меньших значениях для наиболее полного использования вентиля по напряжению классификация по классам производится через 0,5.

Вывод

Для определения основных критериев годности СПП в состоянии низкой проводимости на ИП подаётся последовательность импульсов полусинусоидальной формы с нарастающей амплитудой, и измерение тока $I_{D(R)RM}$ производится при амплитудном значении напряжения U_{DRM} . Основной проблемой при определении класса СПП является то, что определить значение тока $i_{D(R)}$ при амплитудном значении напряжения $u_{D(R)}$ достаточно сложно. Для решения этой задачи необходимо быстродействующее, высокоточное и дорогостоящее оборудование.

Литература

1. ГОСТ 24461–80 (СТ. СЭВ 1656–79). Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний. – М. : Издательство стандартов, 1981. – 56 с.
2. Лабунцов, В. А. Динамические режимы эксплуатации мощных тиристоров / В. А. Лабунцов, Н. М. Тугов. – М. : Энергия, 1977. – 192 с.
3. Дерменжи, П. Г. Расчёт силовых полупроводниковых приборов / П. Г. Дерменжи, В. А. Кузьмин, Н. Н. Крюкова и др.; Под ред. В. А. Кузьмина. – М. : Энергия, 1980. – 184 с.

Сведения об авторах

Беспалов Николай Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматике Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, e-mail: bnn48@mail.ru.

Ильин Михаил Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматике Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, e-mail: imike@rambler.ru.

Капитонов Сергей Сергеевич – студент Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва, e-mail: kapitonovfet@rambler.ru.