

Моделирование температурной зависимости

вольт-амперной характеристики силовых полупроводниковых приборов

Получены аналитические выражения, описывающие температурную зависимость прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики силовых полупроводниковых приборов. Путем сравнения теоретических расчетов с экспериментальными данными проверена адекватность полученных выражений.

Сергей Матюхин, к. ф.–м. н.

sim1@mail.ru

Александр Ставцев

techinfo@proton-electrotex.com

Введение

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) является важнейшим параметром силовых полупроводниковых приборов (СПП), поскольку от нее в значительной мере зависит их нагрузочная способность и КПД. Исследованию физических явлений, определяющих ВАХ СПП, посвящена обширная литература (монографии [1, 2] и имеющиеся в них ссылки). Причем на практике в качестве математической модели этой характеристики широкое распространение получила [3] полуэмпирическая формула:

$$U = A + BI + C \ln(I+1) + D\sqrt{I}, \quad (1)$$

которая обобщает результаты многочисленных исследований и удовлетворительно описывает ВАХ приборов различных типов и назначения.

Формула (1) описывает проводящее состояние СПП. В этой формуле I — прямой ток, протекающий через полупроводниковый прибор, U — индуцируемое этим током падение напряжения, а коэффициенты A , B , C и D являются подгоночными параметрами модели и на практике определяются из условия наилучшего совпадения результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными. При этом считается, что обратный ток насыщения I_s , протекающий через СПП в закрытом состоянии, достаточно мал, поэтому обратная ветвь ВАХ СПП обычно не рассматривается.

Следует отметить, что, как и другие параметры полупроводниковых приборов, их ВАХ зависит от температуры. Другими словами, коэффициенты A , B , C и D в формуле (1), а также обратный ток I_s проявляют температурную зависимость. Поэтому в настоящее время в спецификациях, содержащих информацию о приборах, как правило, приводятся их ВАХ при двух разных значениях из рабочего диапазона температур (обычно это 25 °С и 125 °С). При этом кривые, соответствующие этим ВАХ, строятся на основе выражения (1), в котором коэффициенты A , B , C и D определяются опытным путем по резуль-

татам двух независимых испытаний, проводимых при указанных температурах. В случае же, если возникает необходимость в определении ВАХ прибора при некотором третьем значении температуры, приходится проводить новое испытание (для определения A , B , C , D и I_s) или довольствоваться интерполяцией имеющихся кривых, точность которой зависит только от опыта и твердости руки исследователя.

В настоящей работе температурная зависимость коэффициентов в выражении (1), описывающем прямую ветвь ВАХ СПП, изучена исходя из их физического смысла. Получены простые аналитические выражения для этой зависимости и показано, что с хорошей точностью ее можно считать линейной.

Помимо этого, исследована зависимость от температуры обратного тока I_s , протекающего через СПП в закрытом состоянии. Показано, что в области высоких температур существенное влияние на значение этого тока оказывает сопротивление низколегированных областей прибора. Предложена удобная математическая модель, позволяющая по экспериментальным данным строить кривые, соответствующие обратной ветви ВАХ СПП.

Температурная зависимость прямой ветви ВАХ СПП

Как известно [1, 2], при прямом включении СПП падение напряжения U на нем (во включенном состоянии) складывается из падения напряжения U_{pn} на одном или нескольких p - n -переходах прибора и падения напряжения U_R на низколегированных областях его структуры:

$$U = U_{pn} + U_R. \quad (2)$$

При этом падением напряжения на контактах прибора и на его высоколегированных областях с большой степенью точности можно пренебречь.

Падение напряжения U_{pn} [4–6] вносит основной вклад в полное падение напряжения (2) при малых токах I , протекающих через СПП. Учитывая то, что

в рабочих режимах обратный ток насыщения $I_s \ll I$, в этом случае можно записать:

$$U \approx U_{pn} \approx c \frac{kT}{e} \ln \frac{(I+1)}{I_s}, \quad (3)$$

где k — постоянная Больцмана; e — элементарный заряд; T — температура прибора, c — коэффициент пропорциональности (подгоночный параметр модели), зависящий от количества и технологических особенностей изготовления p - n -переходов.

Существование U_{pn} связано с существованием потенциального барьера U_0 между граничащими друг с другом p - и n -областями. Высота этого барьера (в вольтах) при не слишком низких температурах определяется концентрацией N_D донорных атомов в n -области и концентрацией N_A акцепторных атомов в p -области [4–6]:

$$U_0 \approx a \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}, \quad (4)$$

где a — подгоночный параметр модели; n_i — концентрация собственных носителей заряда:

$$n_i \approx 2 \left(\frac{2\pi \sqrt{m_n m_p} kT}{h^2} \right)^{3/2} \times \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right), \quad (5)$$

где m_n и m_p — эффективные массы электронов и дырок соответственно; E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника; h — постоянная Планка.

Если к полупроводниковому прибору приложено напряжение, большее U_0 , потенциальный барьер между p - и n -областью p - n -переходов исчезает, при этом полное падение напряжения на приборе будет определяться в основном вторым слагаемым в выражении (2), то есть падением напряжения $U_R \approx RI$ на низколегированных областях его структуры:

$$U_R \approx U_0 + RI. \quad (6)$$

В силовой электронике выражение (6) известно как линеаризованная ВАХ СПП [1, 6].

Величина U_0 в этом выражении называется напряжением отсечки, а R — динамическим сопротивлением прибора. Экспериментальная зависимость $R(T)$ достаточно хорошо описывается выражением [1, 6]:

$$R(T) = R_0 [1 + \beta(T - T_0)], \quad (7)$$

где $R_0 \equiv R(T_0)$; β — температурный коэффициент сопротивления, значение которого определяется опытным путем [$\beta = (1-5) \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$].

Отметим, что формула (3) справедлива при $U \leq U_0$. Наоборот, выражение (6) выполняется при $U > U_0$. Таким образом, для прямой ветви ВАХ СПП можно записать следующую интерполяционную формулу, применимую для всех U :

$$U \approx U_0 + RI + c \frac{kT}{e} \ln \frac{(I+1)}{I_s}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет выяснить физический смысл и найти температурную зависимость коэффициентов A , B и C , входящих в полуэмпирическую формулу (1). Сравнивая (8) и (1), пренебрегая изменением ширины E_g запрещенной зоны полупроводника и учитывая температурную зависимость напряжения отсечки (4), динамического сопротивления (7) и обратного тока насыщения (20), для области умеренных температур получаем:

$$\begin{aligned} A(T) &\equiv U_0(T) - \frac{ckT}{e} \ln I_s(T) = \\ &= \frac{(a + \gamma c) E_g}{e} - \\ &- \frac{kT}{e} \left[a \ln \frac{4(2\pi \sqrt{m_n m_p} kT)^3}{N_D N_A h^6} + c \ln I_s(\infty) \right], \quad (9) \end{aligned}$$

$$B(T) \equiv R(T) = R_0 [1 + \beta(T - T_0)], \quad (10)$$

$$C(T) \equiv (ckT)/e. \quad (11)$$

Таким образом, температурную зависимость коэффициентов A , B и C в формуле (1) с логарифмической точностью можно считать линейной.

Выражение (8) не содержит слагаемых вида $D\sqrt{I}$. Это объясняется тем, что связь между падением напряжения на низколегированных областях прибора и силой прямого тока предполагалась тоже линейной, что и нашло отражение в формулах (6–8). В то же время хорошо известно [1, 2, 4], что линейная зависимость $U(I)$ наблюдается только в том случае, если основным механизмом рассеяния свободных носителей заряда в полупроводнике является их рассеяние на фонах и других неоднородностях решетки, а основным механизмом их рекомбинации является линейная рекомбинация, например на примесных центрах. Учет таких эффектов, как электронно-дырочное рассеяние (ЭДР) или нелинейная Оже-рекомбинация, снижение коэффициентов инжекции эмиттерных переходов, а также эффекты сильного легирования могут приводить [1, 2] к нелинейному росту падения напряжения U при увеличении тока I .

В выражении (1) указанное обстоятельство учитывается при помощи последнего слагаемого $D\sqrt{I}$. Следует, однако, иметь в виду, что это слагаемое является целиком подгоночным и только приближенно описывает ВАХ СПП в области слабой нелинейности. Поэтому, исходя из физического смысла этого слагаемого, практически невозможно получить однозначную температурную зависимость коэффициента D . Она будет определяться конкретным типом нелинейности и в настоящей работе не рассматривается.

Оправданием этому может служить тот факт [1, 2], что нелинейные эффекты проявляются только при очень больших плотностях тока j 1–3 кА/см², которых нельзя достичь при работе серийных приборов. Для этих СПП линейная зависимость (6) изотермической ВАХ вплоть до j 1 кА/см² подтверждается не только экспериментом, но и теоретическими исследованиями, результаты которых наиболее полно представлены в монографиях [1, 2].

Таким образом, изотермические ВАХ серийных СПП с высокой степенью точности могут быть описаны выражением (1), в котором $D > 0$:

$$U = A + BI + C \ln(I + 1). \quad (12)$$

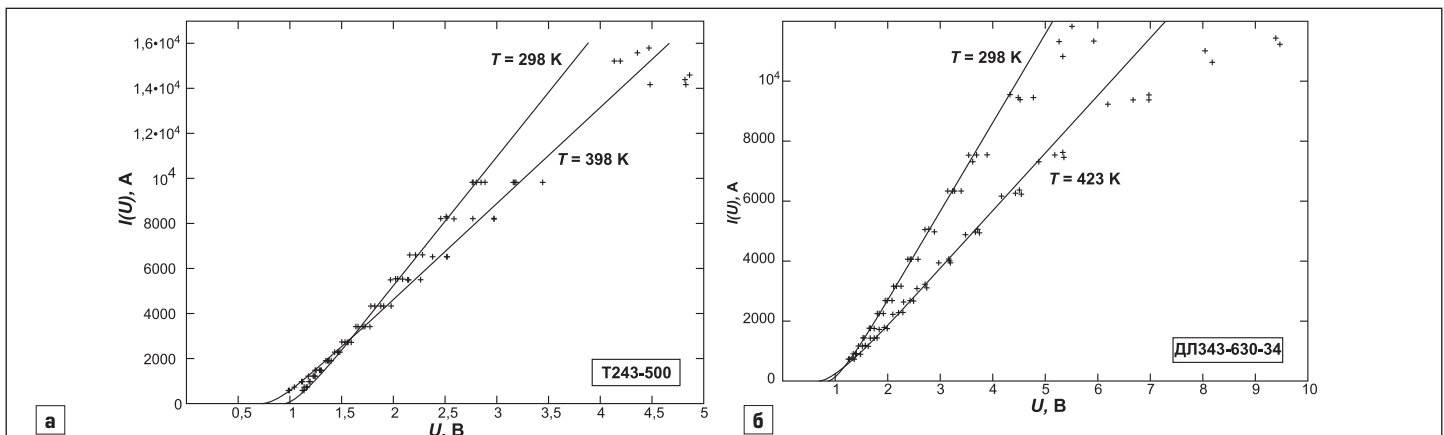


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики, рассчитанные по формулам [9–12] (сплошные кривые) и полученные экспериментально (маркеры) при двух значениях температуры T (экспериментальные измерения проводились для двух выборок, каждая из которых состояла из четырех однотипных серийных приборов): а) тиристора Т243-500; б) диода ДЛ343-630-34

Закключение

Температурная зависимость коэффициентов A , B и C в этом выражении описывается формулами (9–11), которые с точки зрения практических приложений удобно записать в виде:

$$A(T) = A_0[1 - \alpha(T - T_0)], \quad (13)$$

$$B(T) = R_0[1 + \beta(T - T_0)], \quad (14)$$

$$C(T) = C_0(T/T_0), \quad (15)$$

где $A_0 \equiv A(T_0)$, $R_0 \equiv R(T_0) \equiv B(T_0)$, $C_0 \equiv C(T_0)$, а α и β — постоянные, значения которых определяются опытным путем.

Сравнение теоретических расчетов, проведенных по формулам (9–12), с экспериментальными данными, соответствующими ВАХ тиристора Т243-500 и диода ДЛ343-630-34, представлено на рис. 1.

Как показывает этот рисунок, предлагаемая теория удовлетворительно описывает результаты измерений. Отклонение экспериментальных зависимостей $U(I)$ от теоретических кривых в области больших I объясняется тем, что при таких токах поддерживать постоянной температуру СПП практически невозможно, поэтому в области больших I приборы в ходе измерений незначительно нагревались. В соответствии с формулами (6) и (7) при заданных токах I это приводило к увеличению измеряемых значений U по сравнению с реальными значениями, соответствующими исходной температуре приборов.

Температурная зависимость обратной ветви ВАХ СПП

При обратном включении СПП его полное сопротивление R_s будет складываться из сопротивления R_{pn} обратно смещенных p - n -переходов и сопротивления R низколегированных областей его структуры:

$$R_s = R_{pn} + R. \quad (16)$$

При этом обратный ток, протекающий через прибор, как правило, достаточно быстро насыщается уже при малых приложенных напряжениях U (слабой зависимостью генерационного тока от обратного напряжения [5] мы здесь пренебрегаем), поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать обратную ветвь ВАХ СПП только в области ее насыщения. Соответствующий ток насыщения:

$$I_s = U/R_s = U/(R_{pn} + R). \quad (17)$$

Обычно при умеренных температурах $R_{pn} \gg R$, поэтому:

$$I_s \approx U/R_{pn}. \quad (18)$$

Этот ток связан с диффузией через обратно смещенные p - n -переходы неосновных

носителей заряда и определяется [4–6] диффузионной длиной L_n , временем жизни τ_n и равновесной концентрацией p_{p0} электронов в p -областях и диффузионной длиной L_p , временем жизни τ_p и равновесной концентрацией p_{n0} дырок в n -областях:

$$I_s \sim e \left(\frac{L_n}{\tau_n} n_{p0} + \frac{L_p}{\tau_p} p_{n0} \right) = e \left(\frac{L_n}{\tau_n p_{p0}} + \frac{L_p}{\tau_p n_{n0}} \right) n_i^2, \quad (19)$$

где p_{p0} и n_{n0} — равновесные концентрации дырок в p -областях и электронов в n -областях соответственно.

Таким образом, учитывая (5), температурную зависимость обратного тока I_s в области умеренных температур можно описать следующим выражением:

$$I_s(T) \approx I_{s0} \exp\left(-\frac{\gamma E_g(T_0 - T)}{kT_0 T}\right), \quad (20)$$

где $I_{s0} \equiv I_s(T_0)$; γ — подгоночный параметр модели, значение которого можно определить опытным путем.

Сопротивление R_{pn} при обратном включении СПП, как и падение напряжения U_{pn} при его прямом включении, обусловлено существованием потенциального барьера U_0 между граничащими друг с другом p - и n -областями. Как показывают формулы (4) и (5), при фиксированном значении обратного напряжения U с ростом температуры T прибора за счет увеличения концентрации n_i собственных носителей заряда высота этого барьера может уменьшиться настолько, что сопротивление R_{pn} окажется меньше сопротивления R низколегированных областей СПП, которое согласно (7) с ростом температуры увеличивается. Таким образом, в области высоких температур в соответствии с формулой (17):

$$I_s(T) \approx \frac{U}{R(T)} = \frac{U}{R_0[1 + \beta(T - T_0)]}. \quad (21)$$

Используя выражения (20) и (21), на основании равенства (17) можно записать (22).

Полученное выражение представляет собой интерполяционную формулу для температурной зависимости обратного тока насыщения, применимую при всех T .

Графики этой зависимости, построенные для серийного тиристора Т243-500 при двух значениях обратного напряжения U (0,5 и 1 В), представлены на рис. 2 (сплошные кривые). Пунктирная кривая на этом рисунке соответствует формуле (20).

Полученные в настоящей работе результаты показывают, что существуют простые аналитические выражения, адекватно описывающие температурную зависимость ВАХ СПП. Так, прямая ветвь ВАХ серийных приборов с высокой степенью точности описывается выражением (12), коэффициенты которого, как показывают формулы (13–15), проявляют линейную зависимость от температуры. А выражение (22) является удобной математической моделью обратной ветви этих ВАХ.

Температурная зависимость обратного тока насыщения $I_s(T)$ представлена на рис. 2. Как показывает этот рисунок, в области высоких температур низколегированные области СПП оказывают ограничивающее влияние на значения этого тока. Причем это влияние особенно заметно при малых приложенных напряжениях U .

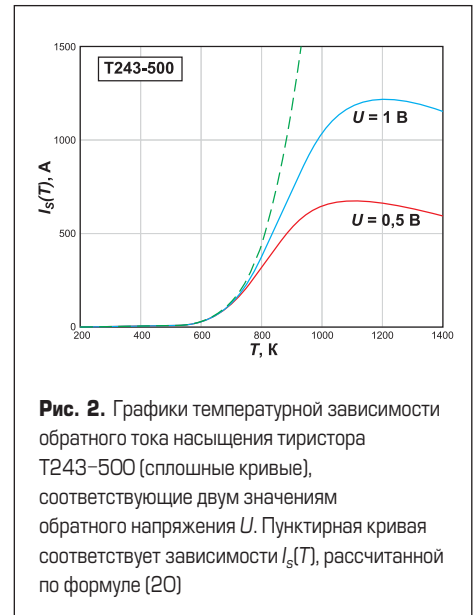


Рис. 2. Графики температурной зависимости обратного тока насыщения тиристора Т243-500 (сплошные кривые), соответствующие двум значениям обратного напряжения U . Пунктирная кривая соответствует зависимости $I_s(T)$, рассчитанной по формуле (20)

Указанное обстоятельство следует учитывать при разработке и проектировании СПП, рассчитанных для работы при повышенных температурах полупроводниковой структуры.

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. Отблеск А. Е., Челноков В. Е. Физические проблемы в силовой полупроводниковой электронике. Л.: Наука, 1984.
3. Тиристоры. Информационные материалы ABB Semiconductors AG // ABB Semiconductors AG. 1999.
4. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. М.: Высшая школа, 1971.
5. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2008.
6. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы. М.: Энергоиздат, 1981.