

Определение эффективности ограничения напряжения диодных структур

Ахмад РАХМАТОВ
Ойбек АБДУЛХАЕВ
Абдулазиз КАРИМОВ
karimov@physic.uzsci.net
Азамат КАХОРОВ
Жамил КАЛАНДАРОВ
Станислав СКОРНЯКОВ
skorn-stas@yandex.ru

Для защиты РЭА от перенапряжений все более широкое распространение приобретают кремниевые ограничители напряжения (ОН), представляющие собой силовые диоды, к которым предъявляются специфические требования [1]. Для оптимизации конструкции ОН важны методики контроля и анализа различных физических характеристик, определяющих качество этих приборов. В статье рассматривается оригинальный способ определения эффективности ограничения импульсных перенапряжений приборами данного класса.

Известно, что отбраковка полупроводниковых приборов, в частности, кремниевых ограничителей напряжения, используемых для эффективной защиты РЭА от импульсных перегрузок [2], осуществляется скоростным способом с помощью характериографов. При этом учитывается технологический разброс параметров для каждого типа прибора. Однако результаты таких измерений не отражают параметры конкретного прибора, не оцениваются также параметры отдельных элементов, входящих в сборку (арматуру) конкретных приборов. Специалисты, работающие с ограничителями напряжения, используют стандартный метод измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) с помощью схем с определенным значением сопротивления, ограничивающего ток до безопасных значений [3]. На рис. 1 а приведена типичная схема для измерения ВАХ полупроводникового диода.

В данной схеме из-за линейной характеристики сопротивления ограничения тока ($R_{огр} = 1 \text{ кОм}$) реальное значение тока ограничения может отличаться от задаваемого. То есть при достижении предпробойного

участка сопротивление ограничителя напряжения принимает минимальное значение и ток определяется напряжением, падающим на сопротивлении, а не на ограничителе. Поэтому при скачке входного напряжения возможен выход из строя ограничителя напряжения и прибора, нагруженного на него. В то же время для расчета и определения эксплуатационных и физических параметров конкретного прибора необходимы более точные измерения семейства электрических характеристик.

С учетом этих обстоятельств возможно усовершенствование методов измерений, а также измерительных электронных схем. Измерение параметров ограничителей напряжения связано с тем, что необходимо получить данные в предпробойном режиме, увязать входящие и выходящие напряжения. В предпробойном режиме необходимо предпринять меры предосторожности, предотвращающие пробой составных элементов ограничителей напряжения. При этом необходимо иметь в виду, что в условиях нормальной работы ограничители являются высокоимпедансной нагрузкой по отношению к защищаемой схеме и служат для защиты цепи. Теоретически устройство

представляет собой как бы разомкнутую цепь с незначительным током утечки. Когда напряжение переходного процесса превысит рабочее напряжение цепи, импеданс ограничителя понизится, и ток переходного процесса начнет течь через ограничитель. Мощность, выделившаяся в этот момент, рассеивается самим ограничителем и определяется максимально допустимой температурой p - n -перехода. Нами предлагается проводить исследования в реальных условиях, а именно — при условии замены ограничивающего сопротивления регулятором тока с сублинейной ВАХ (рис. 1б).

Вольт-амперные характеристики одной из p^+-n-n^+ -структур кремниевых ограничителей напряжения, снятые с помощью данной схемы, приведены на рис. 2.

На рисунке видно, что в области пробоя короткий шаг между точками создает широкий набор точек, необходимый для точной обработки экспериментальных данных. Принцип действия ограничителя напряжения основан на резком уменьшении его сопротивления при достижении некоторого порогового напряжения, приводящего к лавинному размножению носителей в слое объемного заряда запираемого перехода. А именно, при подаче запирающего напряжения электроны и дырки, выталкиваемые полем из p - n -перехода, уходят вглубь областей n - и p -типа, увеличивая толщину объемного заряда, и далее во внешнюю цепь. Закономерность расширения слоя объемного заряда определяет характер p - n -перехода. Обычно в качестве примера рассматривают два крайних случая: резкий p - n -переход, когда толщина слоя обеднения от напряжения описывается выражением

$$W^{p-n} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_K^{p-n} + U_{CM})}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A \times N_D} \right)},$$

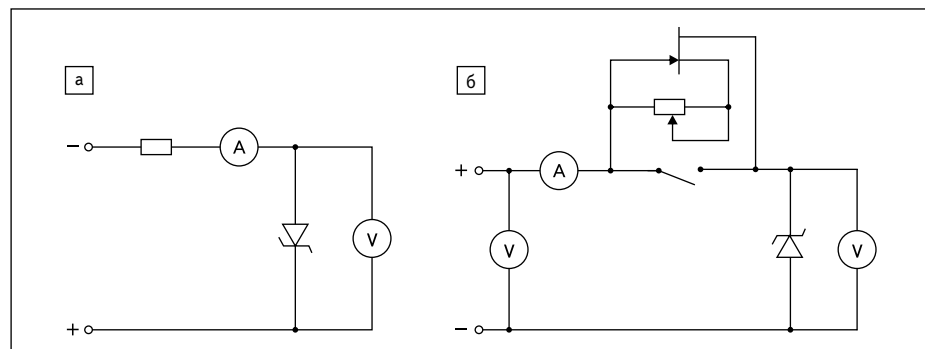


Рис. 1. Типичная электрическая схема измерения ВАХ полупроводникового диода (а) и предлагаемая схема для исследования ограничителей напряжения (б)

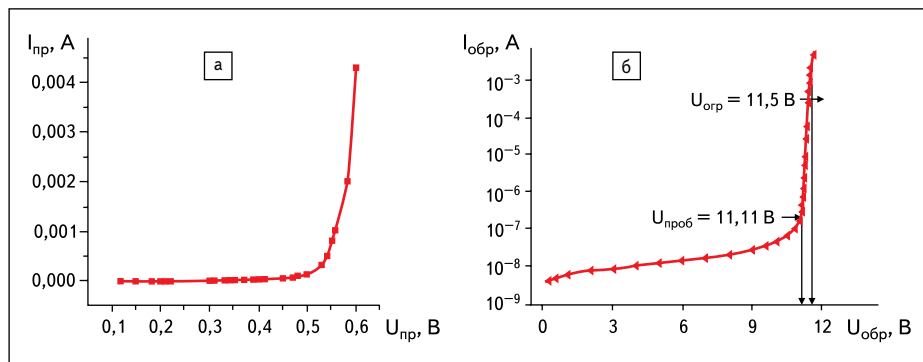


Рис. 2. Прямая (а) и обратная (б) ветви ВАХ ограничителя напряжения на основе p^+-n-p^+ -структуры

и плавный p - n -переход при выполнении зависимости

$$W^{p-n} = \sqrt[3]{\frac{12\epsilon\epsilon_0(U_K^{p-n} + U_{CM})}{qa}},$$

где a — градиент концентрации примеси, см^{-4} [4]. Эти закономерности приводят к квадратичной и кубической зависимости емкости от напряжения.

Если от запирающего напряжения напряженность электрического поля достигнет такой величины, что кинетической энергии будет достаточно для переброса валентного электрона в зону проводимости, то выталакиваемый полем электрон до ухода во внешнюю цепь столкнется с атомами решетки, порождая пару «электрон–дырка». Этот процесс лавинного размножения носителей будет осуществляться в плавном переходе. В резком переходе по мере увеличения запирающего напряжения будет иметь место заметный рост обратного тока.

Таким образом, в ограничителе напряжения при достижении рабочего напряжения низкопроводящее состояние резко (скачком) сменяется высокопроводящим состоянием. Вольт-амперные характеристики, как в прямом, так и в обратном направлениях, отличаются резким ростом тока (рис. 2). В принципе, обратная ВАХ ограничителя напряжения аналогична обратной ВАХ стабилитрона [5]. Но, в отличие от стабилитрона, ограничи-

тель напряжения способен рассеивать значительно большую импульсную мощность, что определяется особенностями его конструкции. Так как важным параметром приборов класса ограничителей напряжения является дифференциальное сопротивление [6], его зависимость от величины протекающего тока дает четкое представление об изменениях состояния прибора в режиме ограничения напряжения. При этом сопротивление по постоянному току R_D представляет собой отношение приложенного напряжения U к протекающему через диод току I :

$$R_D = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_0(e^{qU} - 1)}.$$

Здесь, на прямом участке ВАХ, сопротивление по постоянному току больше, чем дифференциальное сопротивление $R_D > r_D$, а на обратном участке $R_D < r_D$. Отсюда видно, что на начальном участке прирост тока в режиме прямого смещения больше, чем в режиме запирающего перехода, что обеспечивает наименьшее потребление мощности ограничителем напряжения в ждущем режиме. Действительно, как показано на рис. 3, зависимость сопротивления диода от протекающего тока в ограничителе напряжения (рис. 3а) имеет резкий переход в отличие от обычного диода (рис. 3б). В обычных диодах уменьшение сопротивления в зависимости от величины тока происходит более плавно, то есть они потребляют

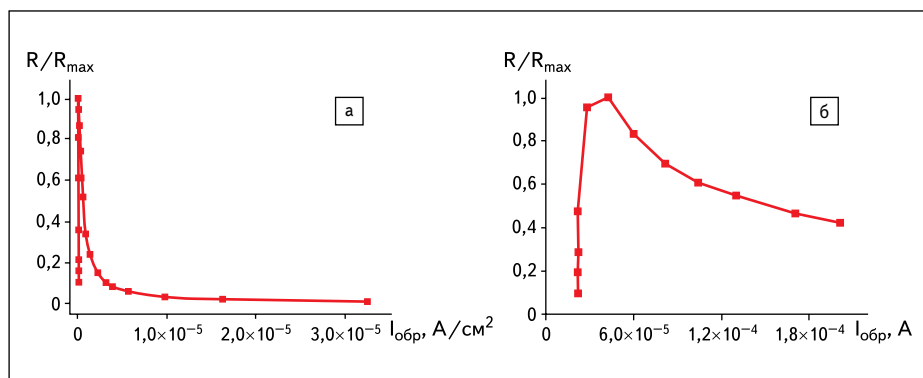


Рис. 3. Зависимость сопротивления от плотности обратного тока p^+-n-p^+ -структуры (а) и обычного диода (б)

Таблица. Зависимость коэффициента эффективности ограничения напряжения от обратного напряжения для ограничителя напряжения на основе кремниевой p^+-n-p^+ -структуры и германиевого диода Д7Д

p^+-n-p^+		Д7Д	
$U_{обр}, \text{В}$	Z	$U_{обр}, \text{В}$	Z
9	0,75942	2,5	0,10873
10,1	0,91684	4	0,51566
10,8	0,96098	4,75	0,58514
11,16	1,00972	5,4	0,56494
11,3	0,99791	6	0,47545
11,38	0,99771	6,75	0,60783
11,42	0,99722	7,5	0,59976

большую мощность. На основе зависимости сопротивления ограничителя напряжения от плотности тока можно оценить коэффициент эффективности ограничения диода. Здесь следует отметить, что каждый диод классифицируется при определенном токе, то есть для их сопоставления необходимо пользоваться плотностью тока. Коэффициент эффективности ограничения определяется отношением приращения напряжения к вызвавшему его малому приращению тока, то есть определяется наклоном ВАХ в области пробоя.

Согласно рис. 3, коэффициент эффективности ограничения напряжения можно определить на основе следующего выражения:

$$Z = \frac{\ln \frac{R}{R_{\max \text{ опр}}} - \ln \frac{R}{R_{\max \text{ проб}}}}{\ln I_{\text{опр}} - \ln I_{\text{проб}}}.$$

То есть качество ВАХ ограничителя напряжения тем выше, чем меньше его сопротивление в области пробоя. Расчетные данные коэффициентов эффективности ограничения напряжения для ограничителя напряжения на основе кремниевой p^+-n-p^+ -структуры и германиевого диода Д7Д приведены в таблице.

Как видно из таблицы, коэффициент эффективности ограничения в германиевом диоде доходит максимум до 0,6, а в кремниевом ограничителе напряжения — до 1,00972, что характерно для ограничителей напряжения [7].

Таким образом, использование предлагаемой схемы снятия вольт-амперных характеристик и методика определения эффективности ограничения напряжения через зависимость сопротивления диода (ограничителя напряжения) от плотности тока в области пробоя позволяет определить коэффициент эффективности ограничения в расширенном диапазоне пробивных напряжений.

В следующей публикации авторы планируют представить результаты экспериментальных исследований различного типа кремниевых ограничителей напряжения, производимых в России и Узбекистане.

Литература

1. Скорняков С., Рахматов А., Павлов В. Кремниевые ограничители напряжения — эффективные элементы защиты радиоэлектронных устройств // Компоненты и технологии. 2008. № 3.
2. Характернограф для испытания полупроводников HZ4832 — http://www.chinasako.ru/6_HZ.html
3. Установка для измерения ВАХ полупроводникового диода — http://rc.asu.ru/docs/db/vuz/_276.doc
4. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Книга 1. М.: Мир. 1984.
5. Григорьев Б. И. Элементная база и устройства аналоговой электроники. СПб: СПбГУ ИТМО. 2008.
6. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. М.: Энергия. 1977.
7. Полупроводниковые самовосстанавливающиеся элементы защиты электронных схем — <http://www.computerbooks.ru/books/CAD/Book-Schemotehnic/Glava%207/Index0.htm>