

К вопросу о методологии оценки надежности силовых полупроводниковых приборов

Расчетная оценка показателей надежности преобразователей электрической энергии на силовых полупроводниковых приборах (СПП) может быть выполнена только при наличии информации о показателях надежности всех входящих в преобразователь элементов, в том числе СПП. Однако, учитывая большую мощность таких приборов и длительность ресурсных испытаний, большое разнообразие в режимах работы и уровне нагрузки, получение такой информации является сложной методической, технической и экономической проблемой.

Предлагается проводить ресурсные испытания в двух режимах:

1. Только под действием приложенного к СПП высокого напряжения при отсутствии силового тока.

2. При наличии силового тока при низком напряжении.

Такое разделение режимов позволяет выявить все скрытые технологические дефекты в полупроводниковом элементе и его контактных соединениях, что необходимо для определения потенциально ненадежных образцов. Данная методика позволит также получить и начальную количественную информацию о ресурсных возможностях конкретных типов СПП.

**Вадим Бардин,
профессор, к. т. н.**

Денис Пьянзин, к. т. н.

Анатолий Брагин

В настоящее время в преобразователях электрической энергии наряду с традиционными силовыми полупроводниковыми приборами — диодами и тиристорами — широко используются силовые полупроводниковые транзисторы, которые позволяют существенно улучшить технические характеристики преобразователей и расширить области их применения. Транзисторы и модули на их основе применяются в устройствах различного назначения: в инверторных источниках питания электронных устройств, в преобразователях для заряда аккумуляторных батарей, в установках индукционного нагрева, в сварочных аппаратах, в импульсных модуляторах радиотехнических генераторов и многих других устройствах.

Понятно, что технические решения и режимы работы транзисторов в устройствах различного назначения могут сильно различаться. Различия состоят, прежде всего, в величине и форме протекающего через транзисторы тока, величине приложенного напряжения, частоте коммутации, в характере и количественных характеристиках переходных процессов, эффективности охлаждения и т. д. Все эти отличия могут существенно влиять на показатели надежности полупроводниковых приборов и преобразователей в целом.

Кратко напомним, что это за показатели. В теории надежности принято считать, что при работе любых изделий, в любых режимах эксплуатации существует так называемый этап приработки, на котором выявляются все скрытые дефекты. Часть изделий на этом

этапе может отказать или заметно изменить свои параметры. После приработки интенсивность отказов оставшихся работоспособных приборов сохраняется более или менее постоянной в течение длительного времени. И наконец, когда приборы приближаются к своему полному износу, то есть вырабатывают свой ресурс, интенсивность отказов быстро возрастает.

Под интенсивностью отказов $\lambda(t)$ понимают число отказов за единицу времени:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N(t)\Delta t},$$

где:

n — количество отказавших за время элементов;

N — общее число элементов;

Δt — интервал времени, на котором производится оценка текущего значения λ .

Количественное значение этого показателя изготовитель изделия должен указывать в справочной информации.

В зависимости от типа полупроводникового прибора, качества его изготовления, жесткости режима работы, этап приработки может составлять от нескольких часов до нескольких сотен часов. Обычно на данном этапе удается выявить большинство потенциально ненадежных образцов (ПНО).

Отказы СПП могут быть внезапными (полными) или постепенными (частичными). При внезапном отказе прибор выходит из строя с пробоем или обрывом, а при постепенном — из-за ухудшения отдельных характеристик прибора, когда его дальнейшая

эксплуатация становится невозможной или нежелательной. Для выявления постепенных отказов требуется установить, какое абсолютное изменение критериального параметра следует считать критическим. Критериальными параметрами, например для транзисторов, могут быть: снижение блокирующего напряжения, увеличение теплового сопротивления, увеличение падения напряжения на приборе в состоянии высокой проводимости, возрастание тока утечки и другие [1]. Но главным критериальным параметром является температура полупроводникового элемента. Однако в отличие от других параметров ее прямое измерение невозможно.

К дополнительной информации, которая способна характеризовать надежность СПП, можно отнести следующую:

- зависимость интенсивности отказов от величины нагрузки;
- скорость изменения критериальных параметров в процессе работы;
- статистическое распределение основных параметров перед началом эксплуатации и после определенного времени наработки, а также ряд других.

Разработчики и изготовители преобразовательных устройств, применяющие СПП отечественных и зарубежных фирм, заинтересованы в использовании качественных приборов с высокими гарантированными техническими характеристиками. Желание обеспечить высокую надежность создаваемых преобразователей предполагает наличие не только ответственного поставщика СПП, но и собственной возможности для экспресс-проверки основных параметров приборов на этапе входного контроля. Это особенно актуально в связи с появлением на рынке поддельной продукции с неизвестным качеством.

Определить количественные показатели надежности с высокой достоверностью можно только на большом статистическом материале, полученном в результате специальных ресурсных испытаний или по результатам длительной эксплуатации аппаратов. С учетом большой мощности силовых приборов для проведения ресурсных испытаний требуется мощное оборудование и значительные финансовые затраты. Несмотря на эти сложности, количественные показатели надежности СПП должны быть указаны в технических условиях (ТУ) на выпускаемые предприятием приборы.

Поскольку оценка количественных показателей надежности СПП является сложной проблемой, а ее разрешение — длительным процессом, при подготовке ТУ на новые приборы разработчики и изготовители СПП обычно указывают показатели надежности по аналогии или на уровне показателей ранее выпускавшихся приборов. На данном этапе ни изготовители, ни потребители объективно подтвердить такие показатели не могут. Это во-первых. Во-вторых, проведение всякого рода ресурсных испытаний мощных приборов наталкивается на целый ряд организационных, технических и экономических трудностей. К основным из них относятся следующие:

1. Высокая потенциальная надежность приборов. Для ее определения требуется проведение большого объема (как по количеству испытуемых приборов, так и по продолжительности) ресурсных испытаний, что связано в том числе и с серьезными экономическими затратами.
2. Недостаточная изученность механизмов ресурсных отказов СПП не позволяет априори оценивать возможный вид функций распределения отказов и сократить объем испытаний.
3. Режимы работы приборов в аппаратуре различного назначения могут сильно различаться, что определяет отличия в механизмах отказов приборов и в количественных показателях надежности. Ресурсные испытания в частных (базовых) режимах в принципе позволяют получить как функции распределения отказов, так и количественные показатели. В одной из работ [1] предложено все варианты режимов работы СПП свести к четырем базовым: статическому (номинальному), динамическому, циклическому и ударных токов.

Статический режим предполагает длительную работу СПП при номинальных рабочих токах и напряжениях без их резкого и существенного изменения.

В динамическом режиме токи и напряжения при работе аппаратов могут периодически или случайным образом изменяться, но не выходить за установленные ограничения, прежде всего, по рабочей температуре полупроводниковой структуры прибора. Такой режим типичен для преобразователей при изменении нагрузки (пуск двигателя, сварочный режим, колебания напряжения питающей сети и др.).

Для циклического режима определяющим фактором являются периодические измерения температуры СПП в широких пределах (от минимального значения до предельно допустимого). Данный режим характерен для преобразователей тяговых двигателей электроподвижного состава, различных подъемных механизмов и т. д.

И наконец, в режиме ударных токов приборы подвергаются воздействию импульсного тока. Причиной таких перегрузок могут быть короткие замыкания в цепи нагрузки или перегрузки технологического характера.

В соответствии с приведенной классификацией режимов работы должны создаваться и методики ресурсных испытаний. Но даже при таком разделении режимов процесс испытаний является весьма длительным, экономически высокочувствительным и не всегда дает нужные результаты. Может оказаться, что к концу испытаний полученные результаты устареют из-за появления новых модификаций и типов СПП. Поэтому изготовители приборов пытаются найти более приемлемые пути хотя бы приблизительной оценки количественных показателей надежности. В частности, путем проведения ресурсных испытаний в форсированных режимах с последующим пересчетом количественных показателей надежности к рабочим режимам. Но поскольку функции такого пересчета, как правило, нелинейные

и априори неизвестные, то достоверность результатов не может быть высокой.

Кроме того, результаты ресурсных испытаний в каких-либо частных (базовых) режимах, а тем более в форсированных, мало пригодны для расчетной оценки показателей надежности проектируемых преобразователей. Режимы работы СПП в преобразователях различного назначения могут сильно отличаться от базовых. Поэтому в ряде публикаций предлагается определять показатель интенсивности отказа введением поправочных коэффициентов к базовой величине. В набор таких коэффициентов входят [3]:

- Кр — коэффициент режима, зависящий от электрической нагрузки и температуры;
- Кф — коэффициент функциональной специфики режима работы;
- Кэ — коэффициент жесткости условий эксплуатации.

Однако значения указанных коэффициентов нигде не приводятся. Поэтому такой подход носит чисто ознакомительный характер и для инженерной практики не годится.

Учитывая широкую номенклатуру приборов разных изготовителей и большое разнообразие режимов их работы в преобразователях, появляются сомнения с целесообразности проведения испытаний в каких-либо частных режимах.

К методике проведения испытаний, предназначенных для оценки потенциальных ресурсных возможностей СПП, можно подойти иначе. Если исходить из физики процессов, то все механизмы деградационных изменений в СПП можно «привязать» к двум состояниям прибора: проводящему и непроводящему. А по месту их проявления — к объему, поверхности полупроводникового элемента и к контактам этого элемента внутри корпуса прибора. Три эти зоны определяют как запорные свойства прибора, так и его возможности по току. Данный подход позволяет проводить испытания при раздельном воздействии на прибор только высокого напряжения (при закрытом состоянии прибора) или только тока, без приложения высокого напряжения. Испытания при воздействии напряжения позволяют выявить все дефекты как на поверхности, так и в объеме полупроводникового элемента. А испытания при большой плотности тока, приводящего к нагреву структуры прибора, помогают учесть основные деградационные механизмы: шнурование тока на отдельных участках полупроводникового элемента, изменения в контактных соединениях, электрический пробой, тепловую нестабильность вольт-амперной характеристики и некоторые другие. Кроме того, раздельные испытания в режимах, близких к предельным, уже на этапе приработки могут выявить и отбраковать все потенциально ненадежные образцы. Однако существующие методики выходного контроля СПП на предприятиях-изготовителях не обеспечивают достаточно полной и объективной отбраковки ПНО. В большинстве случаев потребитель также не может это сделать из-за отсутствия необходимого оборудования.

Предлагаемый подход позволяет систематизировать все частные задачи, связанные с исследованием надежности любых силовых полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров, транзисторов) независимо от их типа и мощности. Кроме всего прочего, такой подход существенно сокращает энергетические затраты на проведение исследований. В реальных аппаратах полупроводниковые приборы работают при высоких напряжениях и на токах, близких к номинальным. В режиме раздельных испытаний к прибору может быть приложено высокое напряжение, но будет отсутствовать силовой ток. Токовые испытания могут проводиться при низких питающих напряжениях, вплоть до десятков вольт. В обоих случаях это позволяет значительно снизить потребляемую мощность.

Все полупроводниковые приборы весьма чувствительны к различного рода экстремальным воздействиям, в частности к перегрузкам по току. При больших, пусть даже кратковременных перегрузках приборы быстро выходят из строя. Поэтому одной из важных задач является создание методик и оборудования для оценки предельно допустимых величин таких перегрузок, чтобы уточнить разумные

запасы по току при проектировании преобразователей. Истинные значения предельных возможностей конкретного СПП могут быть определены только в результате разрушающих воздействий, после чего использование прибора становится невозможным. Поэтому существует отдельная задача создания методик и оборудования для неразрушающего определения предельной величины токовой перегрузки для каждого СПП.

Как следует из всего изложенного, проблема исследования надежности силовых полупроводниковых приборов и условий обеспечения их безопасной работы в преобразователях электрической энергии является многогранной и сложной, как в научном, так и в прикладном значении. Причем при постановке и решении конкретных задач следует в первую очередь исходить из интересов разработчиков и изготовителей преобразовательных устройств. Потребителя интересует не глубина научной проработки проблемы, а скорее практические результаты, которые он может использовать при создании надежной техники. Поэтому в настоящий момент наиболее актуальными следует считать задачи по созданию методик и оборудования для отбраковки ПНО и нераз-

рушающей оценки предельных возможностей СПП по основным параметрам. ■

Литература

1. Бардин В. М. Надежность силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1978.
2. Бардин В. М., Новиков Д. П. Основные направления работ в области надежности силовых полупроводниковых приборов // Практическая силовая электроника. 2005. № 2.
3. Кравченко Е. В. О методах оценки надежности полупроводниковых устройств силовой электротехники. Современная техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, изд-во ТПУ, 2014.
4. Горлов М. И., Сергеев В. А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. Под науч. ред. Горлова М. И. Изд. 2-е. Ульяновск, УлГТУ, 2015.
5. Громов В., Илюшкин И. Вопросы контроля и обеспечения надежности ИЭТ для силовой электроники // Силовая электроника. 2005. № 2.