

## Силовые полупроводниковые приборы для железнодорожного транспорта.

*«Кто не знает, в какую гавань он плывет, для того нет попутного ветра».*

*(Сенека, римский философ-стоик, поэт и государственный деятель)*



В настоящее время железнодорожный транспорт играет важную роль в функционировании и развитии товарного рынка страны. Он является основным звеном транспортной системы Украины и неразрывно связан с таким понятием как поезд.

Поезд — это сформированный и сцепленный состав, состоящий из нескольких вагонов, с одним или несколькими действующими локомотивами или моторными вагонами, приводящими его в движение. Один из видов локомотивов – электровоз.

Электровозом называют локомотив, приводимый в движение электрическими двигателями, которые получают электрическую энергию через токоприемник от контактной сети. В контактную сеть электроэнергия поступает от тяговой подстанции. В зависимости от рода используемого тока различают электровозы постоянного тока и электровозы переменного тока. Есть также электровозы двойного питания постоянным и переменным током. Наибольшее применение на электроподвижном составе нашли тяговые двигатели постоянного тока. Для преобразования переменного тока в постоянный (точнее, пульсирующий) на электровозах переменного тока устанавливают выпрямители в которых используют полупроводниковые приборы. В неуправляемых выпрямителях используют диоды, имеющие двухслойную р-п структуру. В преобразователях, предназначенных не только для выпрямления, но и для регулирования выпрямленного напряжения и инвертирования (т. е. преобразования постоянного напряжения в переменное) используют полупроводниковые тиристоры. Неуправляемые выпрямители широко применяют на электровозах переменного тока для питания тяговых двигателей в режиме тяги.

Для увеличения надежности электротехнического оборудования тягового подвижного состава железнодорожного транспорта используют лавинные диоды которые не разрушаются при значительных перенапряжениях и после снятия обратного напряжения восстанавливают свои параметры.

Лавинный пробой р-п перехода является следствием ударной ионизации атомов полупроводника. При определенных значениях напряженности электрического поля энергия неосновных носителей заряда движущихся через р-п переход, оказывается достаточной для того, что бы при столкновении их с атомами кристаллической решетки происходил разрыв валентных связей этих атомов со своими электронами. В результате ударной ионизации появляются новые свободные пары электрон-дырка, которые в свою очередь разгоняются полем и создают всевозрастающее число носителей заряда. Процесс ионизации характеризуется лавинным размножением носителей и приводит к значительному возрастанию обратного тока через переход [1]. Лавинный пробой р-п перехода носит микро-плазменный характер [2]. При детальном исследовании пробоя было установлено, что ток пробоя формируется вдоль серии хаотически расположенных каналов проводимости, пронизывающих р-п переход и называемых микроплазмами. Причинами микроплазм являются всякого рода дефекты такие как нарушения кристаллической решетки и включения, на которых электрическое поле превышает среднее значение, характерное для объемного заряда всего р-п перехода.

Лавинные диоды – это выпрямительные диоды с контролируемым лавино-образованием, позволяющим рассеивать в течение ограниченного интервала времени импульс мощности в области пробоя обратной вольтамперной характеристики.

Лавинные диоды позволяют исключить или существенно упростить элементы защиты от перенапряжений в схемах преобразователей, особенно в случае большого количества последовательно соединенных диодов.

В процессе разработки лавинных диодов выработаны требования к качеству исходного кремния:

- ограничение плотности дислокаций до  $N_g \leq 10^2 \text{ см}^{-2}$ ;
- исключение свирл-дефектов, дефектов упаковки;
- ограничение содержания  $O_2$  и  $C$ ;
- уменьшение примесей тяжелых и щелочных металлов.

Однородность удельного сопротивления кремния является важным условием изготовления диодов с повышенными перегрузочными характеристиками.

Технологическая обработка при создании p-n перехода не должна вносить значительных повреждений кристаллической решетки кремния.

Выпрямительные элементы изготавливают по сплавной технологии с подбором режимов сплавления посредством силуминовой фольги с молибденовым термокомпенсатором, позволяющих получить минимальные механические напряжения в процессе сплавления.

Сплавная технология и подобранные толщины термокомпенсаторов позволяют обеспечить отсутствие механических напряжений на кремниевой структуре в режимах токовых перегрузок, типичных для подвижного состава. Напыленные аммониевые контакты обеспечивают эффективное растекание тока и оптимальное прямое падение напряжения на диодном элементе. Правильно рассчитанная структура и фаска исключают смыкание области пространственного заряда с приконтактной областью. Геометрия фаски, струйное травление и защита ее исключают поверхностный пробой p-n перехода.

Применение диодов с лавинными характеристиками в выпрямителях для подвижного транспорта исключает отказ диодов при воздействии перенапряжений, характерных для транспортных условий эксплуатации что дает возможность на кратковременную работу с перегрузкой по напряжению при аварийных режимах работы преобразователей. И в отличие от диода, характеризуются таким параметром, как ударная обратная рассеивающая мощность (кВт).

Использование лавинного диода в выпрямительных агрегатах, позволяет увеличить надежность электрических схем и дает возможность уменьшить мощность используемого диода, так как защитную роль от пробоя будет играть лавинный ток, а не дополнительный запас по обратному напряжению силового диода. Тем самым существенно упростить элементы защиты от перенапряжений в выпрямительных установках электровозов.

Элементы силовых полупроводниковых приборов, с целью защиты их от внешних воздействий (механических, климатических и т.д), обеспечения теплоотвода от структур, удобства монтажа в выпрямительных агрегатах, собираются в штыревые корпуса прижимной конструкции и корпуса таблеточного исполнения.

Диоды, с гибким выводом, паяной конструкции (диоды ВЛ200), которые ранее применялись в электровыпрямителях железнодорожного транспорта в отечественной промышленности, сняты с производства в 1980 г. Это связано с тем, что при работе в режимах токового циклирования (включено-выключено), типичных для подвижного состава, приборы такой конструкции имеют низкую надежность, обусловленную развитием усталостных явлений в паяных швах. Так при перепаде температуры  $80^\circ\text{C}$  число циклов до отказа с вероятностью 0,5 составляет 7,5 тысяч.

Современные мощные силовые полупроводниковые приборы, в том числе диоды ДЛ161, ДЛ171, ДЛ243 тиристоры Т161, Т171, Т234 и др. производства ООО «Элемент-Преобразователь», имеют прижимную конструкцию (рис. 1). Известно, что приборы прижимной конструкции имеют число циклов до отказа более 200 тысяч. [3]



а- Диод прижимной конструкции



б- Диод паяной конструкции

Рисунок 2 (а,б) – Внешний вид диодов Д161 прижимной и паяной конструкции

Помимо штыревой конструкции (приборы с гибким выводом), широкое распространение получили силовые полупроводниковые приборы таблеточного типа исполнения, так как у них по сравнению со штыревыми существенно увеличена поверхность охлаждения, улучшен теплоотвод и выше стойкость к перегрузкам.

Для диодов, как и для тиристоров, основными параметрами являются: предельный прямой ток, обратное повторяющееся напряжение, прямое падение напряжения, обратный ток утечки. Кроме того, существуют дополнительные параметры: ток управления, напряжение управления, время включения и выключения, величина заряда обратного восстановления, а также ряд других параметров.

Выпрямительные установки электровозов собраны по мостовой схеме состоящие из определённого количества плеч, с последовательно включенными лавинными диодами или тиристорами и несколькими параллельными ветвями. Так, например, одна выпрямительная установка электровоза ВЛ80т(с) содержит 192 диода типа ДЛ161-200-12 УХЛ2. В каждом плече моста 12 параллельных ветвей, в каждой ветви четыре последовательно включенных лавинных диода (рис 2).

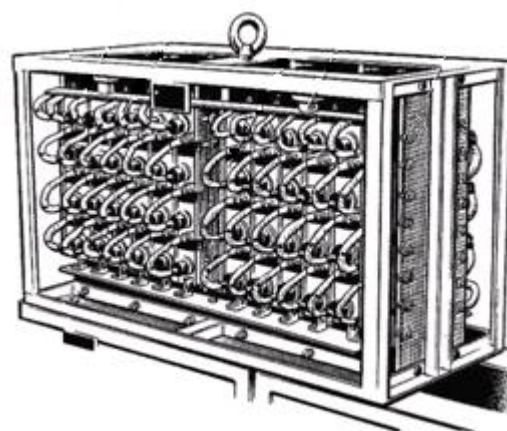
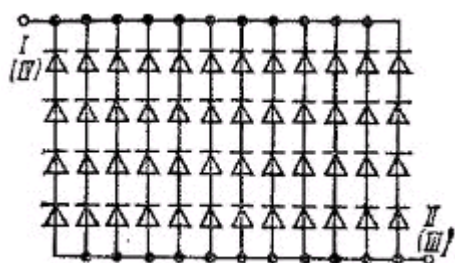


Рисунок 2 – Схема соединения диодов ДЛ161-200-8 УХЛ2 в одном плече выпрямительной установки.

Это требует их дополнительного отбора по значению импульсного прямого падения напряжения. Для удобства замены лавинных диодов ДЛ161 в эксплуатации они разбиты на две подгруппы, каждая из которых имеет следующую маркировку:

I подгруппа 1,11 – 1,16В включительно, что соответствует среднему значению 0,52 - 0,54 В

II подгруппа 1,17 – 1,24В включительно, что соответствует среднему значению 0,55 - 0,58В

Маркировка по значению прямого импульсного напряжения на корпусе диодов обеспечивает возможность их подбора для параллельной работы. Монтаж диодов без подбора приводит к неравномерному распределению тока между ветвями, перегрузке отдельных ветвей и, в результате, снижению надежности работы выпрямительной установки электровоза.

На многих электровозах при движении по спуску, а в некоторых случаях и перед остановками тяговые двигатели переключают для работы в качестве генераторов. При этом кинетическая энергия и потенциальная, запасенная в поезде, преобразуются в электрическую и передаются в контактную сеть. Этот процесс называется рекуперацией электрической энергии. Рекуперация используется для электрического торможения поезда. Такой режим работы характерен и для тягового агрегата ОПЭ-1АМ, выпускаемого ГП НПК «Электровозостроение» г. Днепропетровск. Продукция этого предприятия известна в первую очередь благодаря её высокому качеству.

В состав выпрямительных установок тяговых агрегатов ОПЭ-1АМ входят лавинные диоды ДЛ243 и тиристоры Т243, к качеству которых предъявляются высокие требования. Технология изготовления этих приборов должна обеспечивать стабильность величины импульсного напряжения в открытом состоянии в период их хранения и эксплуатации. Величина этих отклонений не должна превышать  $\pm 0,02В$ .

Для последовательного соединения приборы комплектуют в группы по 24 или 18 штук с подбором по величине заряда обратного восстановления для обеспечения требуемого распределения напряжения в динамическом режиме. Для этого необходим комплекс специального испытательного оборудования.

Конструкторское подразделение ООО "Элемент-Преобразователь" оснащено современными средствами для проведения проектно - исследовательских работ, в области разработки новых и модернизации серийных силовых полупроводниковых приборов. В составе конструкторского подразделения (ОГК) функционирует испытательное подразделение (бюро конструкторских и периодических испытаний СПП), аккредитованное в Госпотребстандарте Украины № Е14-09 от 02.06.09г.(Рис. 3).



Рисунок 3 – Свидетельство об аттестации бюро конструкторских и периодических испытаний СПП и Сертификат соответствия системы менеджмента качества ООО «Элемент-Преобразователь».

Предприятием ООО «Элемент-преобразователь» серийно выпускаются лавинные диоды (ДЛ161) и тиристоры с подбором по значениям импульсного прямого напряжения предназначенных для ремонта выпрямительных установок. За период эксплуатации сообщений о выходах из строя полупроводниковых приборов не поступало. Качество диодов и тиристоров удовлетворяет требованиям по надежности для тяговых агрегатов (согласно полученным отзывам о качестве поставляемой продукции).

Литература:

- [1] Федотов Я.А. «Основы физики полупроводниковых диодов» изд. «Советское радио» Москва – 1970г.
- [2] Грехов И.В., Сережкин Ю.И. «Лавинный пробой р-п перехода в полупроводниках» изд. «Энергия» Москва - 1980г.
- [3] Бардин В.М. «Надежность силовых полупроводниковых приборов» изд. «Энергия» Москва – 1978