

Павлов В.А., Рахматов А.З., Скорняков С.П.

Кремниевые ограничители напряжения – эффективные элементы защиты радиоэлектронных устройств

1. Условия повреждения РЭУ

Надёжность и работоспособность радиоэлектронных устройств (РЭУ) в значительной степени определяются её чувствительностью к кратковременным электрическим перегрузкам, причиной которых могут быть электромагнитные поля (ЭП) искусственного или естественного происхождения. Источники таких полей - грозовые разряды, разряды статического электричества, коммутационные процессы, мощные радиопередающие средства, РЛС, высоковольтные ЛЭП и любые другие электромагнитные импульсы, в том числе – эмитируемые ядерным взрывом [1-6].

Различают грозовые, коммутационные и высокочастотные перенапряжения, а также перенапряжения электростатического разряда. Наиболее опасные из них – грозовые и коммутационные.

Грозовые перенапряжения генерируются при прямом ударе молнии в наружные части электроустановок, а также наводятся электромагнитными полями при близких молниевых разрядах.

Коммутационные импульсы имеют место в сетях электроснабжения при коммутационных процессах, в случаях аварийных ситуаций и при отказе оборудования по тем или иным причинам. Различают также периодические импульсы перенапряжения, присущие колебательным процессам в резонансных контурах коммутируемой цепи.

Высокочастотные перенапряжения образуются в условиях производства вследствие дугообразования или искрения контактов при коммутации электросети механическими выключателями.

Импульсы электростатического разряда (ЭСР) возникают при соприкосновении и последующем разделении разнородных материалов в условиях относительно низкой влажности. В частности, ЭСР человеческого тела может превышать 15 кВ при сухом или морозном воздухе, особенно – в условиях синтетических строительных конструкций и материалов.

Осознание опасностей, обусловленных воздействием импульсных перенапряжений на РЭА и владение методами и средствами защиты от них приобретают, по мере развития электронной техники – вычислительной, автоматики, связи, аудио, видео, космической, автомобильной, корабельной, авиационной и др., всё большую актуальность и значимость.

Устойчивость РЭА к воздействию катастрофических электромагнитных импульсов находится в центре внимания разработчиков электронной аппаратуры. Особенно важно это для устройств с применением микромощных интегральных схем. Для обеспечения надёжности и, соответственно, конкурентоспособности электронных изделий на мировом рынке внутри

Европейского Сообщества (ЕС) разработаны и действуют международный стандарт ITC 801 (МЭК 801) и ряд других базовых документов, регламентирующих требования к устойчивости РЭА к импульсным перегрузкам. Эти стандарты служат критериями выбора при покупке электронного оборудования у различных изготовителей независимо от их географического положения [7].

2. Элементы защиты РЭУ

Для локальной защиты элементов РЭУ от импульсных перенапряжений в основном применяются три типа приборов [8-10]: газоразрядные трубки (ГРТ), металл – оксидные варисторы (МОВ) и кремниевые ограничители напряжения (ОН) - transient voltage suppressors. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. В частности, ГРТ способны шунтировать импульсы огромной энергии, но требуют значительного времени включения. То есть не могут защитить от импульсов короткой длительности. МОВ способны рассеять значительную энергию, однако характеризуются чрезмерной величиной коэффициента перекрытия: отношения импульсного напряжения ограничения к статическому напряжению рабочего состояния схемы. К тому же МОВ подвержены определённой деградации (рост тока утечки) со временем. Кремниевые ОН отличаются высокой скоростью включения – наносекунды и менее, практически не подвержены деградации при использовании их в режимах, рекомендуемых руководством по применению полупроводниковых приборов [11], однако способны шунтировать относительно ограниченное количество энергии. Поэтому зачастую применяют комбинированные устройства защиты, использующие лучшие качества каждого из этих типов защитных элементов, и представляющие собой комбинацию включения различных групп активных элементов защиты (разрядников, полупроводниковых ограничителей напряжения, варисторов, малоемкостных импульсных диодов и т.д.) и пассивных элементов (помехоподавляющих фильтров и конденсаторов), размещенных в едином корпусе.

Однако в большинстве приложений предпочтительно и достаточно применение кремниевых ограничителей напряжения (ОН) – transient voltage suppressors. В частности, для защиты интегральных микросхем от электростатического разряда, отличающегося исключительно малым временем нарастания импульса – от 0.7 до 1 нс и длительностью импульса в пределах 30 – 60 нс.

3. Кремниевые ограничители напряжения

Для защиты цепей постоянного тока от импульсов ЭП по напряжению применяются полупроводниковые ограничители напряжения или стабилитроны с несимметричной вольтамперной характеристикой. Несимметричность ВАХ обеспечивает защиту от импульсных ЭП определённой полярности на разных потенциальных уровнях. Пороговое напряжение этих приборов ниже напряжения ограничения, что обеспечивает автоматическое их отключение от цепи постоянного тока после прохождения импульса ЭП. Время включения этих приборов меньше времени самых быстрых переходных процессов, что

также определяет предпочтительность их применения в цепях постоянного тока.

Отличительная особенность защиты цепей питания переменного тока от цепей постоянного тока - необходимость использования ограничителей напряжения с симметричной ВАХ.

Для защиты информационных цепей и цепей переменного тока высокой частоты используются так называемые малоемкостные ограничители напряжения, в конструкции которых предусматривается встроенный высоковольтный диод, с ёмкостью не более 100 пФ.

В мире выпускается множество типов кремниевых ограничителей напряжения, различающихся по напряжению пробоя (от 0.7 до 3100 В), рассеиваемой импульсной мощности (от 0.15 до 600 кВт), исполнению – симметричные и несимметричные, в металлокерамических и пластмассовых диодных корпусах, диодных, транзисторных и микросхемных корпусах для поверхностного монтажа, малоемкостные, малоиндуктивные и пр. Объёмы продаж ОН ведущими странами – США, Японией, Германией, Францией, Голландией, Китаем исчисляются сотнями млн. долларов [12].

Ограничители напряжения, рассчитанные на напряжения пробоя от 6 до 400В, способные “срезать” паразитные электромагнитные импульсы с мощностью до 15 кВт, разработаны в различном конструктивном исполнении и выпускаются рядом известных фирм: Thomson CSF, Motorola, General Semiconductors Industries, Inc, Simens и др. [12,13].

История развития ОН начинается с создания первых приборов этого класса фирмой General Semiconductors Industries, Inc. (США): в 1968 г. разработано устройство для подавления импульсов перегрузки, наводимых грозowymi разрядами в системах дальней связи, в 1969 г. – для подавления переходных процессов в самолётной аппаратуре, в 1974г. разработана серия приборов для защиты интегральных микросхем, в 1971 г. – симметричные ОН. С 1971 г. ОН используются в военных целях, в 1972 г. они применены для защиты от ЭМИ ядерного взрыва.

По функциональному назначению из массива ОН, созданных зарубежными фирмами, можно выделить несколько самостоятельных видов [15]:

а) ОН общего применения с напряжением пробоя ($U_{проб}$) от 0.7 до 3100 В и мощностью ($P_{и}$) от 0.15 до 600 кВт;

б) малоемкостные ОН с ёмкостью менее 100 пФ, что позволяет использовать их для защиты линий связи с частотой до 100 МГц. Минимизация ёмкости ОН достигается за счёт встроенного в конструкцию ОН малоемкостного высоковольтного ($U_{проб} \sim 1000$ В) диодного кристалла. Простое последовательное включение для этой цели ограничителя напряжения и высоковольтного корпусного диода приводит к возрастанию индуктивного сопротивления;

в) безиндуктивные ОН. Особенно эффективны для защиты от перенапряжений с наносекундной длительностью фронта импульса перегрузки. Исключение собственной индуктивности в такого типа ОН

достигается за счёт применения в конструкции так называемых контактов Кельвина;

г) “матричные” ОН в микросхемных корпусах.

4. Некоторые физические аспекты работы ограничителей напряжения

Основным фактором, поражающим ППП, ИМС и пассивные радиокомпоненты, является воздействие наводимых в цепях РЭА токов и напряжений значительной амплитуды, приводящих к возникновению в них структурных и конструктивных повреждений. Таким образом, при конструировании и выборе технологии изготовления ОН необходимо следовать принципам оптимизации их конструкции относительно этих паразитных воздействий.

По характеру влияния на параметры ППП первичные и вторичные эффекты делят на обратимые (переходные) и необратимые (остаточные).

Переходные эффекты вызывают временную потерю работоспособности ППП, изменение внутреннего состояния ППП, выход режима за допустимые пределы и т.п. В этом случае после воздействия импульса ЭП происходит восстановление работоспособности ППП. Необратимые остаточные эффекты (эффекты повреждения) могут носить параметрический характер (выход одного или группы параметров за допустимые пределы) или форму катастрофического отказа.

Воздействие импульсов ЭП, не достигающих уровня повреждения, способно вызывать кратковременные и долговременные нарушения работоспособности ППП, связанные с нарушением электрического и теплового режимов работы.

Импульсный нагрев внутренних областей ППП протекающими токами до температур, меньших критических, не вызывает появления необратимых повреждений приборов, однако может стать причиной существенного увеличения времени восстановления его работоспособности.

Если релаксация электрических перенапряжений в ППП происходит со скоростью, определяемой процессами диффузии и дрейфа неравновесных носителей заряда в полупроводнике, и занимает, как правило, не более долей микросекунды, то инерционность тепловых процессов существенно выше и может определять время восстановления параметров в ПП.

Γ – образная вольтамперная характеристика ОН в области относительно небольших токов (миллиамперы) идентична ВАХ стабилитронов (зенеровских диодов).

В области больших токов (амперы), характерных для ОН, имеет место существенное отклонение обратной ветви ВАХ ОН от вертикали. Элементы защиты с подобными вольтамперными характеристиками при напряжении в защищаемой цепи ниже порогового их срабатывания (включения) не потребляют энергии от цепи, так как их сопротивление в этом случае велико. При возникновении импульса ЭП по напряжению выше порогового напряжения происходит срабатывание прибора по механизму обратимого электрического пробоя. Сопротивление прибора резко уменьшается, в результате происходит шунтирование цепи.

Электрический пробой, вызванный лавинным или туннельным механизмами, характерен для обратносмещенных переходов [16,17]. Лавинный пробой р-п перехода происходит вследствие лавинного умножения носителей тока под действием электрического поля большой напряженности ($E_{кр}=10^5$ В/см), при котором процесс ударной ионизации основных носителей заряда становится лавинным. Лавинный пробой типичен для слаболегированных переходов. При напряженности электрического поля в кремнии, превышающей 10^6 В/см, что характерно для сильнолегированных низковольтных ($U_{проб}$ менее 7 В) р-п-переходов, возникает высокая вероятность туннельного пробоя и начинают протекать заметные туннельные токи.

Одним из основных вторичных эффектов, вызывающих повреждение ПП, является тепловой вторичный пробой, обусловленный выделением значительной тепловой энергии в р-п-переходе за короткий промежуток времени. Тепловой вторичный пробой вызывает резкое уменьшение обратного сопротивления р-п-перехода при подаче на него напряжения, превышающего пробивное.

Анализ характера повреждения р-п-перехода при вторичном пробое показывает, что явление вторичного пробоя в обратносмещенном р-п-переходе есть результат достижения температуры, соответствующей собственной проводимости, в локализованной области на слаболегированной стороне перехода. При такой температуре локальное сопротивление падает, а локальная плотность тока увеличивается. В результате повышения температуры происходит плавление кремния и, как следствие, короткое замыкание р-п-перехода.

Тепловой вторичный пробой является основным видом повреждения р-п-переходов ПП при обратной полярности воздействующего импульса.

Так как импульсный ток через ОН может достигать сотен ампер, крутизна обратной ветви ВАХ ОН определяется не только динамическим сопротивлением р-п-перехода, но и, в значительной степени, падением напряжения на базе, то есть сопротивлением, толщиной и площадью базы:

$$U_{огр.и} = I_{и} \cdot (R_{д} + \rho_{б} \frac{W_{б}}{S_{p-n}} + R_{к} + R_{в}),$$

где $U_{огр.и}$ – импульсное напряжение ограничения,

$I_{и}$ – импульсный ток,

$R_{д}$ – динамическое сопротивление,

$R_{к}$, $R_{в}$ – сопротивления контактов, выводов,

$\rho_{б}$ – удельное сопротивление базы,

$W_{б}$ – толщина базы,

S_{p-n} – площадь р-п-перехода.

К основным характеристическим и эксплуатационным параметрам ОН относятся:

- напряжение пробоя, $U_{проб}$, - измеряется при постоянном тестовом токе, $I_{проб.т}$, и служит для классификации ОН по группам;
- предельно допустимый импульсный ток, $I_{и.макс}$;

- предельное импульсное напряжение ограничения, $U_{огр.и}$. Соответствует предельно допустимому напряжению в схеме, где ОН используется;

- обратный ток утечки, $I_{обр}$, - измеряется при постоянном обратном напряжении, $U_{обр}$ ($U_{обр} \approx 0.83U_{проб}$), соответствующем обычно рабочему напряжению в схеме, где ОН используется. Характеризует качество химической очистки и диэлектрической защиты р-п-перехода и, по сути, - долговременную стабильность прибора;

- время включения (теоретическое), $t_{вкл}$. Характеризует быстродействие прибора. Зависит от конструкции ОН. Для ОН, работающих на обратной ветви ВАХ, $t_{вкл}$ определяется временем пролёта основных носителей через область пространственного заряда обратносмещённого р-п-перехода ($t_{вкл} \approx 10^{-12}$ с). Для ОН, работающих на прямой ветви ВАХ (ОН стабилитронного типа) $t_{вкл}$ определяется временем пролёта неосновными носителями базы ($t_{вкл} \approx 10^{-9}$ с).

5. Принципы конструирования и технологии изготовления ограничителей напряжения

Ограничитель напряжения – силовой прибор, к которому предъявляются специфические требования. В частности, он должен обеспечивать длительную работу, рассеивая без существенного ущерба для себя сотни и тысячи паразитных импульсов значительной мощности.

Достаточно ограниченный объём внешней информации, например [18], а также собственные оценки и экспериментальные результаты, позволяют сформулировать основные принципы конструирования и технологии изготовления кремниевых ограничителей напряжения.

Конструкция

1. Так как ОН должен выдерживать воздействие мощных импульсов тока, конструкцию его целесообразно делать паяной. Переходные сопротивления соединений в прижимной конструкции приведут к резкому ограничению предельно допустимой импульсной мощности.

2. В отличие от стабилитрона ОН подвергается воздействию импульсов тока с плотностью до $10^4 - 10^6$ А/см². Соответственно необходимо предпринимать специальные конструкционные меры по обеспечению максимальной импульсной электрической прочности ограничителей.

Для этого кристалл ОН необходимо помещать между достаточно массивными теплоотводящими дисками. Металл дисков должен отличаться высокими теплопроводностью и теплоёмкостью. В этом качестве, таким образом, целесообразно рассматривать серебро, медь, алюминий. Выбор определяется по критериям стоимости и технологичности. С этой точки зрения предпочтительна медь. Серебро дорого. Алюминий плохо паяется. Медь покрывают либо никелем, либо серебром, что обеспечивает хорошие условия для пайки. Толщина дисков должна быть соизмерима с длиной тепловой волны, распространяющейся при воздействии импульса из области р-п-перехода. В частности, для импульсов с длительностью ~ 1 мс толщина дисков должна быть не менее 0.5 мм. Увеличение массы (толщины) дисков заметно повышает предельную импульсную мощность и импульсную наработку ограничителей напряжения.

3. Для соединения деталей конструкции ОН пайкой целесообразно использовать достаточно мягкие припои на основе свинца, то есть с температурой плавления не выше 400°C [18]. Причём целесообразно – с некоторым содержанием серебра. Например, типа ПСр2.5. Серебро в припое повышает стойкость спая к циклическому воздействию температуры.

4. Герметизация ОН осуществляется как в металlostеклянных корпусах, так и опрессовкой в пластмассу. Для 1.5-кВт – ных ОН применяются, например, металlostеклянные корпуса типа DO-13 (КД-32 по ГОСТ 18472) и пластмассовый типа СВ-429 (КД-7Е по ГОСТ 18472). Следует указать как на сдерживающий фактор развития направления ограничителей напряжения, в частности, ОН специального назначения, на отсутствие в СНГ производства металlostеклянных корпусов для герметизации силовых диодов. В настоящее время ФГУП «НЗПП с ОКБ» ведёт разработку металлокерамического корпуса типа КД-7Е. При положительном результате этой работы должна быть решена проблема производства ОН с импульсной мощностью 1.5 кВт.

Кристалл.

1. Важнейшим принципом конструирования и технологии изготовления кристалла ОН следует считать принцип “тонкой” базы: чем тоньше относительно высокоомный базовый слой, тем меньше последовательное сопротивление и, соответственно, падение напряжения на базе, то есть выделение на базе греющей мощности. Особенно это ощутимо при воздействии предельных по мощности коротких (ниже 1 мс) импульсов. Поэтому для ОН с Упроб свыше ~ 10 В целесообразно использовать эпитаксиальные структуры. Ограничение по нижнему пределу Упроб связано с возможностями современной технологии эпитаксиального наращивания.

2. Следует стремиться к формированию р-п-перехода на максимально возможной глубине. Вероятный основной механизм деградации ОН при воздействии мощных импульсов тока связан с накоплением механических напряжений в области спая кристалла с диском, возникающих под действием тепловой волны, распространяющейся из области р-п-перехода. Температура на р-п-переходе при воздействии мощных импульсов может достигать значений, существенно превышающих температуру плавления припоя. [20]. Для предельных по мощности импульсов возможно плавление припоя даже несмотря на кратковременность воздействия. Экспериментами это вполне подтверждается. То есть припой подвергается циклическим воздействиям нагрев - охлаждение. В результате в слое спая накапливаются механические напряжения. В свою очередь, поле механических напряжений, распространяющееся из области спая в кремний, воздействует на р-п-переход, приводя к деградации его параметров. И это воздействие будет тем значительнее, чем ближе р-п-переход к поверхности кристалла. Таким образом для силовых диодов идеальным следует считать расположение р-п-перехода в середине кристалла.

3. Рабочий р-п-переход в кристалле силового прибора должен быть плоским. Поэтому, как правило, р-п-переход выводится на тонкую боковую поверхность кристалла, что делает проблематичным его диэлектрическую защиту.

4. Пассивация р-п-перехода осуществляется разными способами. Наименее эффективным, хотя и довольно распространённым, является способ защиты компаундом. Наиболее прогрессивным следует считать пассивацию тонкими диэлектрическими слоями с применением жидкостной меза – технологии. В качестве таковых применяют термический оксид кремния (SiO_2), фосфоросиликатное стекло, нитрид кремния (Si_3N_4). Компания Diotec применяет плазменное травление мез и плазменную жепассивацию р-п-переходов нитридом кремния с последующим нанесением полисилоксана [18].

5. Площадь кристалла должна быть максимально возможной для данной конструкции прибора, так как допустимая рассеиваемая мощность ей пропорциональна. Вследствие этого обычно применяют кристалл ОН шестигранной формы, что обеспечивается стандартными способами разделения пластин со структурами на кристаллы.

6. В качестве омических контактов к кристаллу ОН применяются типичные металлические слои и их комбинации (Ti-Ni , Al-Ni , V-Ag и т.п.), обеспечивающие низкие значения переходных сопротивлений и приемлемые условия растекания припоя, то есть необходимую высокую сплошность паяного соединения. Последнее чрезвычайно важно, так как плотность тока импульсов перегрузки может достигать 10^5 см^{-2} и более.

Возможны различные конструктивно – технологические варианты изготовления кристаллов ограничителей напряжения.

При выборе рабочего варианта приходится ориентироваться, во-первых, на наличие необходимого технологического оборудования, и, во-вторых, - на необходимость обеспечения удовлетворительных технико – экономических показателей: требуемых технических характеристик, надёжности, процента выхода годных, себестоимости и т.д.

Эпитаксиальный вариант, наилучшим образом отвечает основным требованиям к кристаллу ОН. В частности, к выполнению принципа тонкой базы. Однако для кристаллов с $U_{проб}$ менее 10 В эпитаксиальный метод становится практически неуправляемым.

Квазиэпитаксиальный вариант, основанный на соединении кремниевых пластин разного типа проводимости методом капиллярного втягивания алюминия с последующей прогонкой алюминия через слой р-кремния, также неудовлетворителен из-за низкого выхода годных, чрезмерной трудоёмкости и относительно большого расхода базового материала – кремния.

Диффузионный способ формирования р-п-структур ограничителей напряжения. Недостаток этого способа изготовления кристаллов ОН – относительно большая величина базы. Однако анализ экспериментальных данных для диффузионных и эпитаксиальных структур с одним и тем же типом проводимости базы (п-тип) и идентичными значениями $U_{проб}$ свидетельствуют о существенном превышении базовых сопротивлений эпитаксиальных структур (ЭС) над базовыми сопротивлениями диффузионных структур (ДС). В частности, соотношение удельных сопротивлений ЭС и ДС для $U_{проб} \sim 100 \text{ В}$ выглядит следующим образом: 1.5 : 0.3. Причина – более плавное распределение легирующей примеси (меньший градиент) в диффузионном р-п-

переходе, чем в эпитаксиальном, так как относительно резкий эпитаксиальный р-п-переход формируется в режиме кратковременного (~60 мин) низкотемпературного (~1160°C) процесса. Диффузионные р-п-структуры ОН формируются при температурах порядка 1200 – 1250°C в течение 24 – 60 ч. Таким образом, требование к толщине базового слоя диффузионных структур может быть существенно мягче, чем в случае эпитаксиальных структур.

5. Состояние разработки и производства ограничителей напряжения

В России и СНГ производство и применение ОН до сих пор носит ограниченный характер. В последние годы спрос на ОН расширился. Прогнозируется резкое его увеличение по мере накопления опыта применения таких приборов для электрической защиты РЭА, как коммерческого, так и специального назначения, и в связи с наблюдаемой динамикой рынка электронных приборов, в частности, средств связи и автоэлектроники.

Первая НИР по разработке ограничителей напряжения на основе эпитаксиальной технологии выполнена предприятием ОАО «Сапфир», г.Москва. Начиная с 1978 г, последующие ОКР по разработке ОН средней мощности (0.5 – 5 кВт) с Упроб менее 200 В проводились на предприятии ФГУП «НЗПП с ОКБ», г.Новосибирск [21].

ФГУП «НЗПП с ОКБ», г.Новосибирск (<http://www.nzpp.ru>) специализируется на производстве 1.5 и 5.0 кВт-ных ограничителей напряжения с Упроб от 3.9 до 400 В как общего, так и специального применения.

Литература

1. Рикетс Л.У. и др. Электромагнитный импульс и методы защиты. Атомиздат, М., 1979.
2. Харрисон У.Л.и др. Ядерный взрыв в космосе, на земле и под землей. Воениздат, М., 1974.
3. Устойчивость радиоэлектронной аппаратуры к воздействию электромагнитного импульса при ядерном взрыве. //Радиоэлектроника за рубежом. Вып.10 (1008), М., 1981.
4. Кравченко В.И. и др. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. «Радио и связь», М., 1987.
5. Кондратьев Б.В., Попов Б.В. Ограничители для защиты радиоэлектронной аппаратуры от перенапряжения://Обзор.- М.:ЦНИИ ”Электроника”. Сер. Зарубежная электронная техника.-1983, №2 (260), с.42-94.
- 6..Морозова Н.К, Рахматов А.З., Скорняков С.П.. Кремниевые ограничители напряжения. //Сб. «Новые промышленные технологии»,Изд. Минатомэнерго РФ. 1993, №4(258), с.с.27-31.
7. О. Мелвилл Кларк, Дональд Нейл Стандартизация характеристик устойчивости электронного оборудования воздействию импульсных перенапряжений //Электроника. 1992, №11-12, с.97-105.
8. Черепанов В.П. и др. Электронные приборы для защиты РЭА от электрических перегрузок. «Радио и связь», М., 1994.
9. Митрофанова Н.. Weidmuller: система защиты от импульсных перенапряжений. //Компоненты и технологии. 2004, №1, с.с.42-47.

10. Белкин А., Самарин А. Защита линейных цепей телекоммуникационной аппаратуры. //Электронные компоненты. 2005, №2, с.с.81-86.
11. Полупроводниковые приборы. Руководство по применению. ОСТ 11336.907.0-79.
12. Рынки сбыта электронной промышленности США и других ведущих стран в 1989г. //Электроника. 1989, №1, с.с.55, 68.
13. Transient Voltage Suppressors «Transil» //Справочник Фр. Thomson Semiconductors, 1986, vol. 2, 480 p.
14. Transzorbts. Transient Voltage Suppressors. //Справочник США. General Semiconductors Industries, Inc., 1987.
15. Скорняков С.П.. Рахматов А.З. Ограничители напряжения. //Электронная техника, 1992 г., сер.2. Вып. 2, с.с.53-61.
16. Аладинский В.К. Теоретические и экспериментальные исследования электронных процессов при пробое р-п-переходов и некоторые аспекты их практического применения.- Диссертация. М., 1973 г.
17. Скорняков С.П. Разработка физико – технических основ получения диффузионных кремниевых р-п-переходов с туннельным пробоем.- Диссертация. Москва, 1982 г.
18. Колпаков А. Большие технологии маленьких диодов. //Электронные компоненты, 2004, №11, с.с.139-144.
19. Яковлев Г.А. Пайка материалов припоями на основе свинца. //Обзор: ЦНИИ "Электроника", 1978. Сер.7, вып. 9/556. Технология, организация производства, оборудование. 73 с.
20. Блихер А. Физика тиристорov. Л. Энергоиздат, 1981.
21. Рахматов А.З. и др. Ограничители напряжения для электронных автоматических телефонных станций. //Электронная промышленность. 1991, вып.1, с.с. 105-106.