

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СХЕМАХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

1. Общие положения

При проведении практических занятий по этой теме предполагается, что студенты уже изучили следующие разделы теоретической части курса: физические процессы в p - n -переходе, виды пробоев в p - n -переходе, статические и динамические параметры диодов.

Одной из наиболее широких областей применения силовых диодов являются выпрямители различного назначения. *Выпрямитель* – это устройство, преобразующее электрическую энергию переменного тока в энергию постоянного тока. Они применяются в различных электронных аппаратах, т.к. большинство блоков этих аппаратов требует питания постоянным током.

На рис. 1.1 показана структурная схема выпрямителя, в состав которого входят: *силовой трансформатор*, служащий для получения необходимой величины переменного напряжения из напряжения сети; *вентильная группа*, преобразующая напряжение переменного тока в пульсирующее напряжение постоянного тока; *сглаживающий фильтр*, подключенный к выходу выпрямителя, уменьшающий пульсации выходного напряжения.

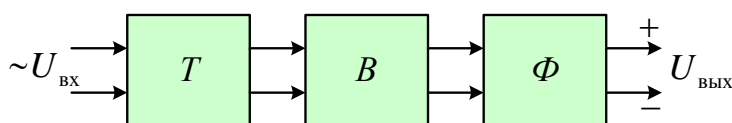


Рис. 1.1

Существует большое количество различных схем выпрямления, но на практике чаще всего применяются наиболее простые из них:

- Однофазная однополупериодная;
- Однофазная двухполупериодная со средней точкой;
- Однофазная мостовая;
- Трехфазная однополупериодная;
- Трехфазная мостовая.

Исходными данными для расчета индивидуального задания № 1 являются:

- Номинальное выпрямленное напряжение на нагрузке U_d ;
- Ток нагрузки I_d ;
- Частота питающей сети f ;
- Количество фаз n ;
- Допустимый коэффициент пульсаций выходного напряжения на нагрузке k_n .

Процесс проектирования выпрямительных устройств можно разделить на несколько этапов:

1. Анализ исходных данных (рассчитать выходную мощность P_d и сопротивление нагрузки R_d);
2. Выбор принципиальной схемы выпрямителя;
3. Расчет параметров сглаживающего фильтра;
4. Расчет параметров выпрямителя;
5. Выбор типа вентильных диодов;
6. Расчет трансформатора;
7. Проверка соответствия применяемых компонентов режиму их работы в выпрямителе.

2. Выбор принципиальной схемы выпрямителя

Выбор схемы выпрямителя производят в зависимости от значения требуемой выходной мощности, выходного напряжения, коэффициента пульсаций, числа фаз.

Однополупериодные выпрямители применяются в основном с емкостным фильтром при токах нагрузки до десятков миллиампер. Преимуществом таких выпрямителей являются простота и возможность работать без трансформатора. Их недостатки: низкая частота пульсаций, высокое обратное напряжение на диодах, плохое использование трансформатора, подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током.

Двухполупериодные выпрямители со средней точкой применяются при напряжениях нагрузки до нескольких десятков вольт и выходной мощности до 50 Вт. На выходе выпрямителя устанавливают Г- или П-образные LC и RC фильтры. Преимущества этих выпрямителей: повышенная частота пульсаций, малое число вентиляей, возможность применения общего радиатора без изоляции вентиляей, малое падение напряжения на вентиляях. Недостатки: большая требуемая габаритная мощность трансформатора, повышенное обратное напряжение на вентиляльных диодах.

Мостовая схема выпрямления применяется наиболее часто. Ее применяют с емкостным, Г- или П-образными LC и RC фильтрами. Достоинством мостовых выпрямителей являются: повышенная частота пульсаций, небольшое обратное напряжение на диодах, эффективное использование трансформатора. Недостатками являются: повышенное падение напряжения на вентиляях, невозможность установки однопольных вентиляей на одном радиаторе без изолирующих прокладок.

Описанные выше рекомендации по выбору схемы выпрямителя используют как для однофазных, так и для трехфазных схем выпрямления.

3. Основные виды сглаживающих фильтров и особенности их применения

Режим работы выпрямителя в значительной степени определяется типом сглаживающего фильтра, включенного на его выходе. В маломощных выпрямителях, питающихся от однофазной сети переменного тока, применяются простейшие емкостные фильтры, в выпрямителях средней и большой мощности – Г-образные LC и RC и П-образные CLC и CRC фильтры.

Основным параметром сглаживающих фильтров является коэффициент сглаживания q , который определяется как отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра $k_{п.вх}$ к коэффициенту пульсаций на нагрузке $k_{п}$:

$$q = \frac{k_{п.вх}}{k_{п}};$$

Емкостной фильтр является наиболее простым из всех видов сглаживающих фильтров. Применение емкостного фильтра рационально при достаточно больших значениях сопротивления нагрузки и коэффициента пульсаций на нагрузке. Фильтр состоит из конденсатора, включенного параллельно нагрузке. Коэффициент пульсаций напряжения на выходе выпрямителя с емкостным фильтром находят:

$$k_{п} \approx \frac{1}{m\omega R_d C},$$

где m – пульсность схемы, т.е. количество пульсаций за период. Для однофазного однополупериодного выпрямителя $m = 1$, для однофазного двухполупериодного со средней точкой и мостового выпрямителя $m = 2$.

Индуктивно-емкостные фильтры (Г-образные LC и П-образного CLC) широко применяются при повышенных токах нагрузки, поскольку падение напряжения на них можно сделать сравнительно небольшим. КПД у таких фильтров достаточно высокий. Недостатки индуктивно-емкостных фильтров: большие габаритные размеры и масса, повышенный уровень электромагнитного излучения от элементов фильтра, сравнительно высокая стоимость и трудоемкость изготовления.

Наиболее широко используется Г-образный LC-фильтр (рис. 3.1). Для эффективного сглаживания пульсаций таким фильтром необходимо выполнение следующих условий:

$$x_C = \frac{1}{m\omega C} \ll R_d; \quad x_L = m\omega L \gg x_C.$$

При их выполнении, пренебрегая потерями в дросселе, для коэффициента сглаживания можно записать: $q = (m\omega)^2 LC - 1$.

Для того, чтобы избежать резонансных явлений в фильтре необходимо выбирать $q > 3$. Кроме этого, одним из основных условий является обеспечение явно выраженной индуктивной реакции фильтра на выпрямитель, необходимой для большей стабильности внешней характеристики выпрямителя. При индуктивной реакции фильтра меньше действующие значения токов в вентиляях и обмотках трансформатора. Для обеспечения индуктивной реакции необходимо, чтобы:

$$L \geq \frac{2U_d}{(m^2 - 1)m\omega I_d} = \frac{2R_d}{(m^2 - 1)m\omega}.$$

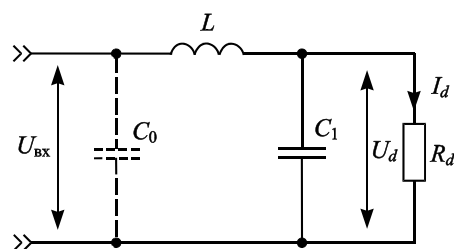


Рис.3.1

Π-образный *CLC* фильтр отличается от описанного *LC* фильтра наличием еще одной емкости C_0 , включаемой на входе фильтра. Расчет таких фильтров производят в два этапа, сначала рассчитывают емкость конденсатора C_0 , исходя из допустимой величины пульсации напряжения на нем, затем по приведенным выше формулам рассчитывают Г-образное звено. Наибольший коэффициент сглаживания в Π-образном фильтре достигается при $C_0 = C_1$.

При выборе конденсаторов фильтра следует следить за тем, чтобы они были рассчитаны на напряжение на 15 ÷ 20% превышающее напряжение холостого хода выпрямителя при максимальном напряжении сети (чтобы учесть перенапряжения, возникающие при включении выпрямителя). Необходимо также, чтобы амплитуда переменной составляющей напряжения на них не превышала предельно допустимого значения.

Резистивно-емкостные фильтры целесообразно применять при малых токах нагрузки (менее 10 ÷ 15 мА) и небольших требуемых коэффициентах сглаживания. Достоинства этих фильтров – малые габариты и масса, низкая стоимость. Недостаток – сравнительно большое падение напряжения на фильтре (что снижает КПД устройства выпрямления в целом).

Простейший Г-образный *RC* фильтр (рис.3.2) состоит из балластного резистора (R_ϕ) и конденсатора (C_1). Коэффициент сглаживания такого фильтра вычисляется по формуле:

$$q = m\omega C \frac{R_d R_\phi}{R_d + R_\phi}.$$

Сопротивление фильтра (R_ϕ) выбирают из условия допустимого падения напряжения на фильтре или исходя из заданного КПД (η) по формуле:

$$R_\phi = R_d (1 - \eta) / \eta.$$

Оптимальным считается КПД порядка $\approx 0,8$.

Расчет Π-образного резистивно-емкостного фильтра (его схема включает дополнительный конденсатор C_0 , показанный на рис.3.2 пунктиром) производится, как и в случае Π-образного *CLC* фильтра, в два этапа после разделения этого фильтра на емкостной C_0 и Г-образный *LC*₁-фильтр.

Комбинированные фильтры применяются при необходимости получения больших коэффициентов сглаживания на выходе выпрямителя. Они представляют собой последовательное включение нескольких фильтров. При каскадном включении *LC*-фильтров можно считать, что суммарный коэффициент сглаживания (q_Σ) равен произведению коэффициентов сглаживания составляющих фильтр звеньев: $q_\Sigma = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdots q_n$. Для нахождения оптимального числа звеньев такого фильтра $n_{\text{опт}}$ при заданном q_Σ можно воспользоваться формулой: $n_{\text{опт}} = \lceil \ln(1/q_\Sigma) \rceil / 2$.

4. Особенности выбора выпрямительных диодов.

Для того чтобы выбрать тип полупроводниковых диодов выпрямителя необходимо рассчитать с учетом характера нагрузки основные характеристики выпрямителя по формулам таблицы 4.1:

- значение максимального обратного напряжения $U_{\text{обр. max}}$, прикладываемого к силовым диодам при работе выпрямителя выбранного типа;
- среднее $I_{\text{пр. ср}}$, действующее $I_{\text{пр. д}}$ и максимальное $I_{\text{пр. max}}$ значения прямого тока диодов;
- частоту f_n и коэффициент k_n пульсаций на выходе выпрямителя.

Характер нагрузки выпрямителя может быть активным, активно-индуктивным или активно-емкостным. Выпрямитель с выходным емкостным или резистивно-емкостным фильтром считается нагруженным на активно-емкостную нагрузку, а выпрямитель с фильтром, начинающимся на индуктивность – на активно-индуктивную нагрузку.

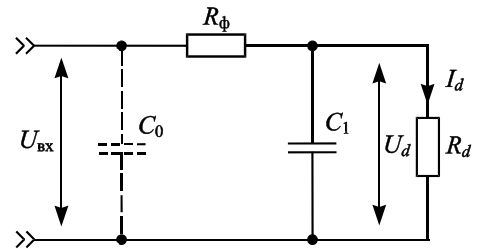


Рис.3.2

Таблица 4.1

| Тип выпрямителя | Тип нагр. | Режим работы диодов | | | | $k_{псх}$ | $f_{п}$ |
|--|-----------|---------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|----------------|------------|
| | | $U_{обр. max}$ | $I_{пр. ср}$ | $I_{пр. Д}$ | $I_{пр max}$ | | |
| Однофазный однополупериодный | R | πU_d | I_d | $\frac{\pi}{2} I_d$ | πI_d | 1,57 | $f_{вх}$ |
| | RC | $2B\sqrt{2}U_d$ | I_d | $D I_d$ | $F I_d$ | $\frac{H}{rC}$ | $f_{вх}$ |
| | RL | πU_d | I_d | $\sqrt{2} I_d$ | $2 I_d$ | 1,57 | $f_{вх}$ |
| Однофазный двухполупериодный со средней точкой | R | πU_d | $\frac{1}{2} I_d$ | $\frac{\pi}{4} I_d$ | $\frac{\pi}{2} I_d$ | 0,66 | $2 f_{вх}$ |
| | RC | $2B\sqrt{2}U_d$ | $\frac{1}{2} I_d$ | $\frac{D}{2} I_d$ | $\frac{F}{2} I_d$ | $\frac{H}{rC}$ | $2 f_{вх}$ |
| | RL | πU_d | $\frac{1}{2} I_d$ | $\frac{\sqrt{2}}{2} I_d$ | I_d | 0,66 | $2 f_{вх}$ |
| Однофазный мостовой | R | $\frac{\pi}{2} U_d$ | $\frac{1}{2} I_d$ | $\frac{\pi}{4} I_d$ | πI_d | 0,66 | $2 f_{вх}$ |
| | RC | $B\sqrt{2}U_d$ | $\frac{1}{2} I_d$ | $\frac{D}{2} I_d$ | $\frac{F}{2} I_d$ | $\frac{H}{rC}$ | $2 f_{вх}$ |
| | RL | $\frac{\pi}{2} U_d$ | $\frac{1}{2} I_d$ | $\frac{\sqrt{2}}{2} I_d$ | I_d | 0,66 | $2 f_{вх}$ |

Немаловажное значение для характеристик выпрямителя имеет тип выбранных выпрямительных диодов. В качестве выпрямительных могут использоваться кремниевые, германиевые или арсенид-галлиевые диоды с $p-n$ переходом (в том числе лавинные диоды), а также кремниевые или арсенид-галлиевые диоды с переходом Шоттки.

Германиевые выпрямительные диоды довольно широко использовались 10 ÷ 20 лет назад. В настоящее время они почти полностью вытеснены более совершенными кремниевыми и арсенид-галлиевыми приборами.

Единственным преимуществом германиевых диодов перед кремниевыми диодами является низкое прямое падение напряжения. На германиевом диоде при максимально допустимом прямом токе падение напряжения приблизительно в два раза меньше, чем на аналогичном кремниевом диоде.

Недостатками германиевых диодов является: существование явно выраженного тока насыщения при обратном включении диода, большая величина обратного тока, пробивное напряжение уменьшается с ростом температуры, низкий верхний предел диапазона рабочих температур. А так же германиевые диоды плохо выдерживают даже кратковременные импульсные перегрузки по обратному напряжению. Определяется это механизмом пробоя германиевых диодов – тепловым пробоем, происходящим при шнуровании тока с выделением большой удельной мощности в месте пробоя.

Кремниевые выпрямительные диоды с $p-n$ переходом – это наиболее распространенный в настоящее время вид диодов, применяемых во всех классах выпрямителей. Их основные свойства:

- максимально допустимые прямые токи кремниевых диодов различных типов составляют 0,1 ÷ 1600 А, падение напряжения на диодах при этих токах не превышает обычно 1,5 В;
- с увеличением температуры прямое падение напряжения уменьшается;
- обратная ветвь вольтамперной характеристики (ВАХ) кремниевых диодов не имеет ярко выраженного участка насыщения;
- пробой кремниевых диодов имеет лавинный характер, поэтому пробивное напряжение с увеличением температуры увеличивается;
- диапазон рабочих температур для кремниевых выпрямительных диодов ограничен значениями $-60 \div 150^\circ\text{C}$.

Лавинный характер пробоя кремниевых диодов позволил создать такие приборы, которые безболезненно переносят многократные перегрузки по обратному напряжению – *лавинные диоды*. Если усло-

вия эксплуатации разрабатываемого выпрямителя очень тяжелы с точки зрения стабильности питающего напряжения или тока нагрузки, то применение лавинных диодов становится практически неизбежным. Они обеспечивают гашение кратковременных импульсов высокого напряжения, проникающих в выпрямитель из внешних цепей. Альтернативой использованию лавинных диодов может быть добавление в выпрямитель стабилитрона или ограничитель напряжения.

Выпрямительные диоды, изготовленные из материала с большой шириной запрещенной зоны, обладают существенным преимуществом в свойствах и параметрах. С этой точки зрения, относительно недавно появившиеся *выпрямительные диоды с p-n переходом из арсенида-галлия* являются очень перспективными приборами. К основным свойствам арсенид-галлиевых приборов относятся: значительный диапазон рабочих температур; лучшие частотные свойства; повышенное падение напряжения в прямом направлении.

Выпрямительные диоды с барьером Шоттки – наиболее перспективный вид полупроводниковых выпрямительных диодов. Они могут изготавливаться из кремния или арсенида галлия. Основными преимуществами диодов с барьером Шоттки являются: малое падение напряжения при прямом включении диода, большая максимально допустимая плотность тока, способность выдерживать значительные перегрузки по току.

Учитывая вышеизложенные рекомендации необходимо подобрать по справочнику наиболее подходящий тип полупроводниковых диодов.

Если характер нагрузки выпрямителя активно-емкостной, выбор типа выпрямительных диодов выполняется в два этапа. Во-первых, необходимо рассчитать значение максимального обратного напряжения $U_{обр.макс}$, а также оценить средние значения прямого тока, протекающего через диоды $I_{пр.ср}$ по формулам таблицы 4.1. для активного характера нагрузки и по данным значениям предварительно выбрать тип диодов. Затем рассчитать вспомогательные коэффициенты по формулам и графикам параграфа 5 и пересчитать основные характеристики выпрямителя по таблице 4.1 для активно-емкостного характера нагрузки.

5. Расчет параметров трансформатора

После выбора схемы выпрямителя, сглаживающего фильтра и типа выпрямительных диодов следует рассчитать параметры требуемого трансформатора и режимов работы всех элементов выпрямителя.

1. Определить сопротивления вторичной обмотки трансформатора $r_{тр}$ и вентилей при прямом смещении $r_{пр}$, а также сопротивление фазы выпрямителя.

$$r_{тр} = \frac{U_d j}{I_d f B} \sqrt{\frac{f B j}{1.6 U_d I_d}},$$

где B – магнитная индукция, Тл; j – средняя плотность тока в обмотках трансформатора, А/мм²; f – частота входного напряжения, Гц.

На практике для выпрямителей мощностью до 10 Вт выбирают $r_{тр} \approx (0,07 \div 0,1) R_d$, а для выпрямителей мощностью 10 ÷ 100 Вт $r_{тр} \approx (0,05 \div 0,08) R_d$.

Сопротивление вентилей, включенных в прямом направлении $r_{пр}$, может быть найдено из справочника на конкретный вид применяемых диодов.

$$r_{пр} = \frac{U_{пр.макс}}{I_{пр.макс}} \approx \frac{U_{пр.макс}}{3 I_{пр.ср}}.$$

Для однополупериодной и двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой: $r = r_{пр} + r_{тр} + R_{\Phi}$, а для мостовой схемы выпрямления $r = 2r_{пр} + r_{тр} + R_{\Phi}$. Сопротивление R_{Φ} – это активное сопротивление сглаживающего RC фильтра, для этих фильтров $R_{\Phi} \approx (0,1 \div 0,25) R_d$.

2. Для случая активно – емкостной нагрузки определить вспомогательные коэффициенты A, F, D, B, H .

Для однополупериодных выпрямителей:
$$A = \frac{I_d \pi r}{U_d}.$$

Для двухполупериодных выпрямителей:
$$A = \frac{I_d \pi r}{2U_d}.$$

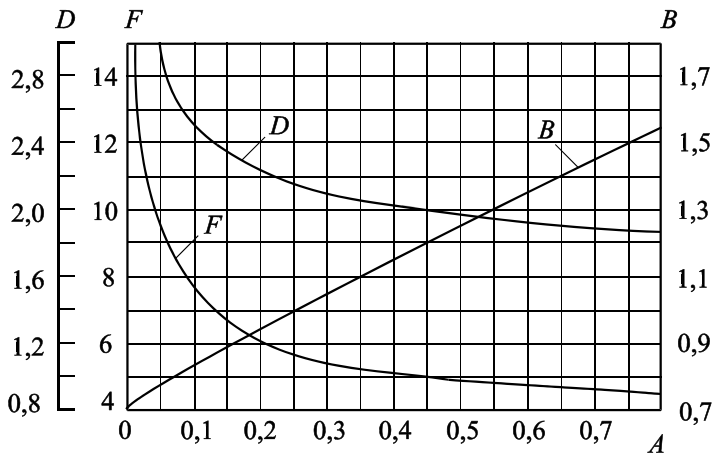


Рис. 5.1

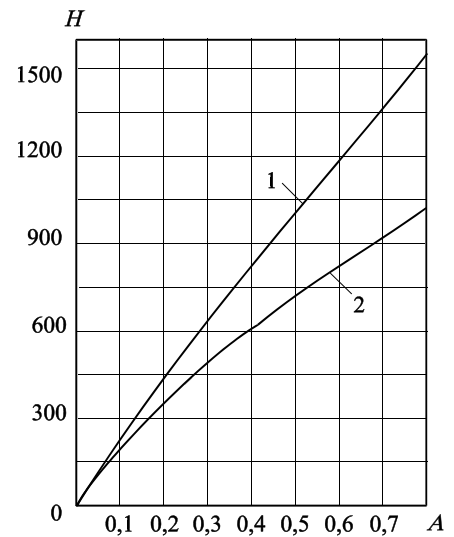


Рис. 5.2

Определить остальные вспомогательные коэффициенты можно с помощью графиков на рис. 5.1, 5.2.

На рис. 5.2 показаны зависимости: 1 – для однополупериодных выпрямителей; 2 – для двухполупериодных и мостовых выпрямителей.

По заданному коэффициенту пульсации k_{Π} определяем емкость конденсатора выходного емкостного фильтра, мкФ:

$$C = \frac{H}{rk_{\Pi}}.$$

3. Рассчитать параметры трансформатора по таблице 5.1:

- действующее значение напряжения $U_{2д}$ и тока $I_{2д}$ вторичной обмотки трансформатора;
- минимальную требуемую мощность вторичной обмотки трансформатора P_2 .

Таблица 5.1

| Тип выпрямителя | Тип нагр. | Параметры вторичной обмотки тр-ра | | |
|--|-----------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| | | $U_{2д}$ | $I_{2д}$ | P_2 |
| Однофазный однополупериодный | R | $\frac{\pi}{\sqrt{2}}U_d$ | $\frac{\pi}{2}I_d$ | $\frac{\pi^2}{2\sqrt{2}}P_d$ |
| | RC | BU_d | DI_d | BDP_d |
| | RL | $\frac{\pi}{\sqrt{2}}U_d$ | $\sqrt{2}I_d$ | πP_d |
| Однофазный двухполупериодный со средней точкой | R | $2 \times \frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_d$ | $\frac{\pi}{4}I_d$ | $2 \times \frac{\pi^2}{8\sqrt{2}}P_d$ |
| | RC | $2 \times BU_d$ | $\frac{D}{2}I_d$ | $2 \times \frac{BD}{2}P_d$ |
| | RL | $2 \times \frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_d$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}I_d$ | $2 \times \frac{\pi}{4}P_d$ |
| Однофазный мостовой | R | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_d$ | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}I_d$ | $\frac{\pi^2}{8}P_d$ |
| | RC | $2BU_d$ | $\frac{D\sqrt{2}}{2}I_d$ | $\frac{BD}{\sqrt{2}}P_d$ |
| | RL | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_d$ | I_d | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}P_d$ |

4. Проверку соответствия применяемых компонентов режиму их работы в выпрямителе необходимо провести, смоделировав полученное выпрямительное устройство с использованием прикладной программы Electronics Workbench. С помощью осциллографа привести форму входного и выходного напряжений выпрямителя и напряжения на нагрузке.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств. 2001 г.
2. Федосеева Е. О. Основы электроники и микроэлектроники. – М.: Искусство, 1990. – 240 с.
3. Четвертаков И. И. Резисторы. Справочник. - М.: Радио и связь, 1987. – 391 с.
4. Четвертаков И. И. Справочник по электрическим конденсаторам. - М.: Радио и связь, 1983. – 252 с.
5. Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы и их зарубежные аналоги. - М.: Радио и связь, 1985. – 288 с.
6. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. К.: Техніка, 1984. – 424 с.
7. Справочник по полупроводниковым приборам и их аналогам. Под редакцией Пыжевского А.М. 1992 г.
8. Петрович В.П. Физические основы электроники.- Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 73 с.
9. Хрулев А. К. Диоды и их зарубежные аналоги : справочник : В 3 т. / А. К. Хрулев, В. П. Черепанов. – М.: РадиоСофт, 1998-. — (Справочник).