

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

А.И. Аксенов  
А.А. Шмидт

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОГО ДИОДНОГО ПРОМЕЖУТКА**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 621.385  
ББК 32.851  
А42

**Рецензент:**

**Климов А.С.**, профессор кафедры физики, доктор технических наук

**Аксенов, Александр Иванович**

А42 Исследование вакуумного диодного промежутка: методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов технических направлений подготовки / А.И. Аксенов, А.А. Шмидт. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 12 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Исследование вакуумного диодного промежутка» по дисциплине для студентов технических направлений подготовки

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 621.385  
ББК 32.851

© Аксенов А.И., Шмидт А.А. 2024  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

## Оглавление

1	Введение .....	4
2	Теоретическая часть .....	4
3	Описание экспериментальной установки.....	7
4	Порядок выполнения работы.....	9
5	Контрольные вопросы.....	9
6	Содержание отчета .....	10
7	Список рекомендуемой литературы .....	10
	Приложение 1 (справочное) Основные и предельные параметры диода 6Х7Б-В.....	11

## 1 Введение

Целью работы является закрепление теоретических знаний по физическим процессам в двухэлектродном ускорительном промежутке и режимах его работы. Знакомство с методикой получения статических характеристик вакуумного диодного промежутка, определение его параметров и выбором оптимального режима эксплуатации.

## 2 Теоретическая часть

Диодный промежуток содержит эмиттер электронов – катод и коллектор электронов – анод, помещенные в вакуумное пространство. Основным свойством диодного промежутка, определяющим его эксплуатационное назначение, является односторонняя проводимость, возникающая при подаче на анод положительного потенциала относительно катода. При подаче на анод относительно катода положительного напряжения в межэлектродном пространстве создается электрическое поле, заставляющее электроны, эмитируемые катодом, устремляться к аноду. В цепи анода возникает электрический ток, который называют током электронного пучка (**анодным током**). При подаче на анод отрицательного напряжения электрическое поле тормозит электроны и возвращает их обратно на катод. В результате анодный ток оказывается равным нулю.

Токопрохождение в диодном промежутке определяется распределением потенциала в межэлектродном промежутке, которое зависит от потенциала анода, межэлектродного расстояния и плотности пространственного заряда электронов, движущихся от катода к аноду.

Возможны три типа распределения потенциала в межэлектродном промежутке (рисунок 2.1).

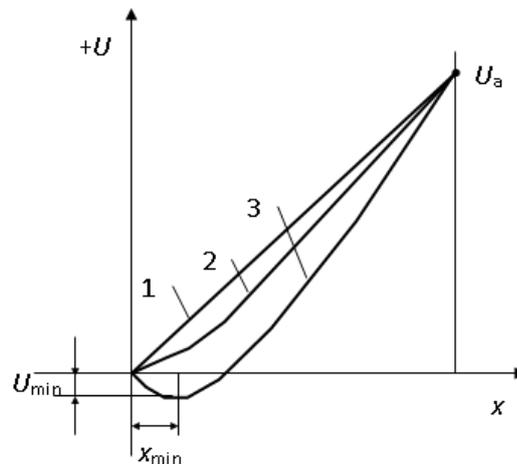


Рисунок 2.1 – Типы распределения потенциала в диоде

Первый тип распределения потенциала (кривая 1 и 2) характеризуется его положительным значением в любой точке межэлектродного промежутка и реализуется, когда потенциала анода достаточно для компенсации отрицательного пространственного заряда электронов в любой точке промежутка. При таком распределении потенциала анодный ток равен току эмиссии катода, так как благодаря ускоряющему электрическому полю все эмитированные катодом электроны уходят на анод. В этом случае ток анода  $I_a$  определяется законом термоэмиссии  $I_e$ :

$$I_a = I_e = AT^2 Q_k e^{-\frac{e\phi_0}{kT}}, \quad (2.1)$$

где  $A$ ,  $\phi_0$  – эмиссионные константы катода;

$T$  – температура катода;

$k$  – постоянная Больцмана;

$e$  – заряд электрона;

$Q_k$  – площадь эмитирующей поверхности катода.

В этом случае ток анода не зависит от анодного напряжения. Такой режим работы называется **режимом насыщения**.

Второй тип распределения потенциала в диодном промежутке (рисунок 2.1, кривая 3) характеризуется наличием у катода пространства с отрицательным пространственным зарядом электронов, т.е. когда положительный потенциал анода недостаточен для компенсации отрицательного пространственного заряда электронов в прикатодной области. На кривой распределения потенциала образуется минимум потенциала  $U_{\min}$  (кривая 3). В этом режиме вылетающий из катода электрон находится на начальном участке пути до точки  $x_{\min}$  под действием тормозящего поля. Преодолеть это поле могут электроны, обладающие начальной скоростью

$$v_0 = \sqrt{\frac{2e}{m} U_{\min}}, \quad (2.2)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$m$  – масса электрона.

В противном случае они будут заторможены и возвращены на катод. Поскольку электроны вылетают из катода с различными начальными скоростями, то не все они могут преодолеть минимум потенциала и попасть на анод. В этом случае выполняется условие  $I_a < I_e$  и токопрохождение определяется законом «степени 3/2».

Такой режим работы диодного промежутка называется **режимом ограничения тока пространственным зарядом**, в котором ток анода зависит только от анодного напряжения и не зависит от тока эмиссии.

В большинстве случаев применения диодных промежутков эксплуатационным режимом является режим ограничения тока пространственным зарядом.

Каждый из рассмотренных режимов работы диодного промежутка характеризуется некоторой связью тока в диодном промежутке с напряжением на электродах. Графическое изображение этих связей носит название «характеристик диодного промежутка».

Основной характеристикой, определяющей работу диодного промежутка, является зависимость анодного тока от анодного напряжения  $I_a = f(U_a)$ . Эта зависимость называется **анодной** или **вольтамперной характеристикой**. На рисунке 2.2 показана анодная характеристика диодного промежутка.

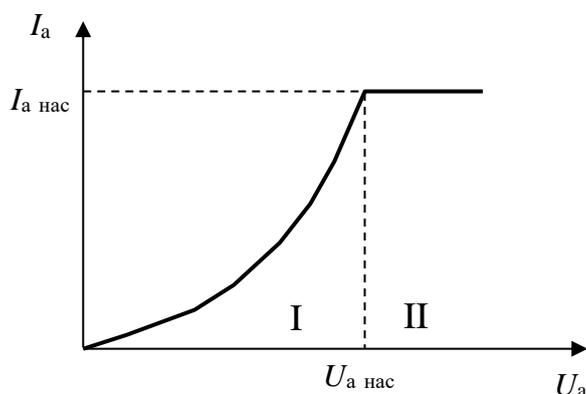


Рисунок 2.2 – Вольтамперная характеристика диодного промежутка

На характеристике можно отметить два участка. На первом участке (I), соответствующем малым значениям  $U_a$ , анодный ток растет при увеличении напряжения

анода. Этот восходящий участок характеристики соответствует режиму пространственного заряда. На этом участке характеристика подчиняется **закону «степени 3/2»**

$$I_a = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{Q_a}{d_{ак}^2} U_a^{\frac{3}{2}}, \quad (2.3)$$

где  $Q_a$  – действующая поверхность анода;

$d_{ак}$  – расстояние катод-анод;

$U_a$  – анодное напряжение.

В области насыщения (II) характеристика диода – горизонтальная линия, так как здесь анодный ток при любых значениях  $U_a$  равен току эмиссии катода (режим насыщения).

Зависимость анодного тока от напряжения накала катода  $I_a = f(U_n)$ , называется **эмиссионной характеристикой**. Семейство эмиссионных характеристик, снятых при двух различных напряжениях на аноде, представлены на рисунке 2.3.

Первая характеристика (1) снималась при большом анодном напряжении  $U_a'$ . В данном случае анодный ток равен току насыщения в любой точке характеристики.

Вторая характеристика (2) снималась при небольшом напряжении анода  $U_a''$ . В этом случае анодный ток из-за ограничивающего действия поля пространственного заряда растет слабо, что и видно на рисунке 2.3.

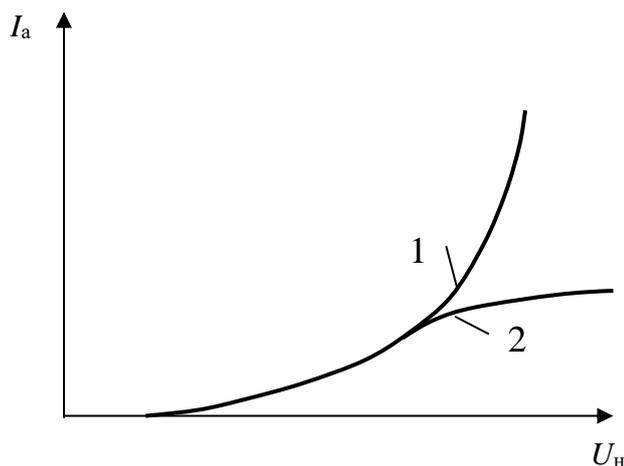


Рисунок 2.3 – Семейство эмиссионных характеристик

**Дифференциальными параметрами** диодного промежутка называются величины, определяющие связь между малыми приращениями напряжений и токов прибора.

Основными дифференциальными параметрами диодного промежутка являются *крутизна анодной характеристики*  $S$  (степень управляемости током анода) и *внутреннее сопротивление диодного промежутка*  $R_i$ .

Для крутизны можно записать следующее соотношение:

$$S = \frac{dI_a}{dU_a}. \quad (2.4)$$

Крутизна численно равна тангенсу угла наклона касательной в данной точке к кривой  $I_a = f(U_a)$ . Обычно крутизна измеряется в мА/В.

Внутреннее сопротивление  $R_i$  характеризует сопротивление лампы переменной составляющей анодного тока:

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a}, \quad (2.5)$$

где  $dI_a$  – приращение анодного тока;

$dU_a$  – приращение напряжения на аноде.

Видно, что внутреннее сопротивление представляет собой величину, обратную крутизне анодной характеристики диода:

$$R_i = \frac{1}{S}. \quad (2.6)$$

Кроме внутреннего сопротивления  $R_i$ , диод характеризуется также сопротивлением постоянному току  $R_o$ :

$$R_o = \frac{U_a}{I_a} = \frac{3}{2} R_i. \quad (2.7)$$

К числу параметров диодного промежутка относится допустимая предельная мощность  $P_{\text{а доп}}$  – мощность, которую может рассеять анод. На рисунке 2.4 представлена кривая предельной мощности, с указанной допустимой для конкретного диодного промежутка рабочей областью.

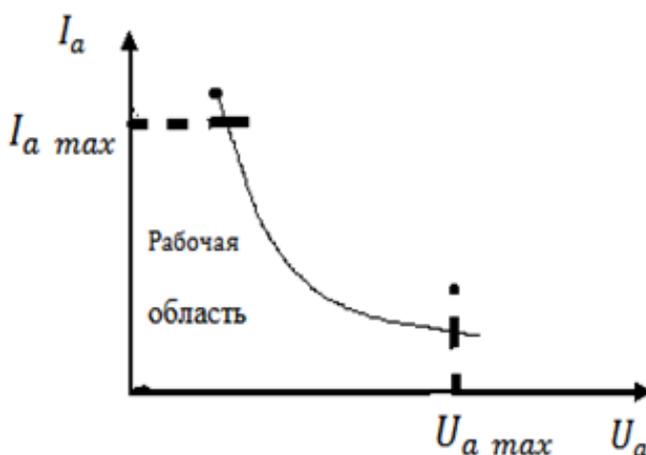


Рисунок 2.4 – Кривая предельной мощности

### 3 Описание экспериментальной установки

Лицевая панель модуля «Электровакуумные приборы» представлена на рисунке 3.1. На ней приведена мнемосхема и установлены коммутирующие и регулирующие элементы. На мнемосхеме изображен двуханодный диод VL1.

В качестве макета диодного промежутка используется сверхминиатюрный двойной диод 6Х7Б-В повышенной надежности и механической прочности в стеклянном оформлении с гибкими выводами. Основные и предельные параметры диода 6Х7Б-В приведены в приложении 1.

Потенциометр  $U_a$  позволяет изменять анодное напряжение, как для снятия характеристик ламп, так и для питания ламповых каскадов в различных схемах включения.

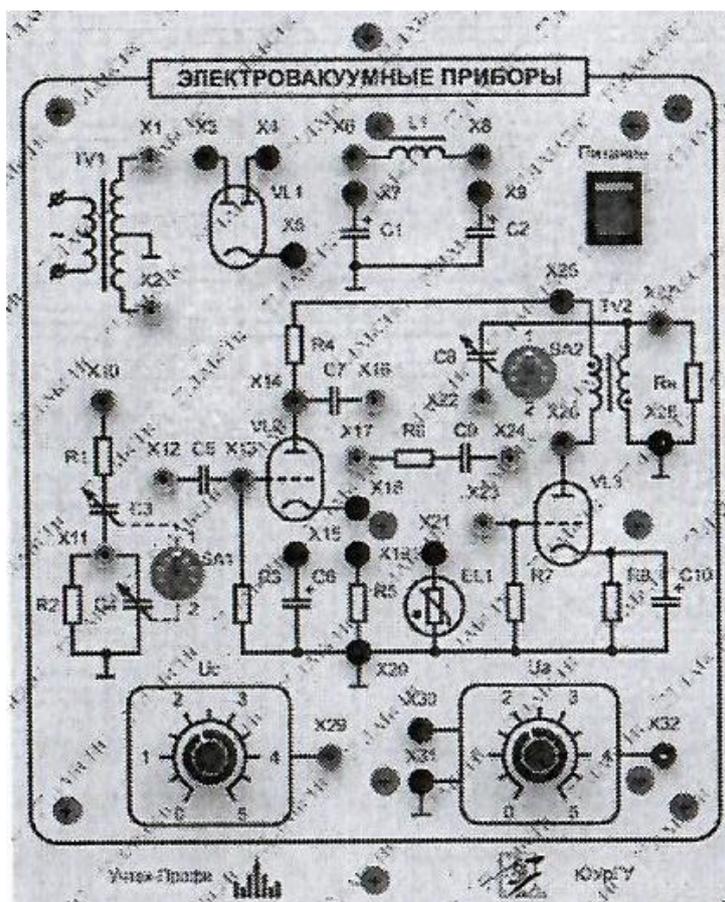
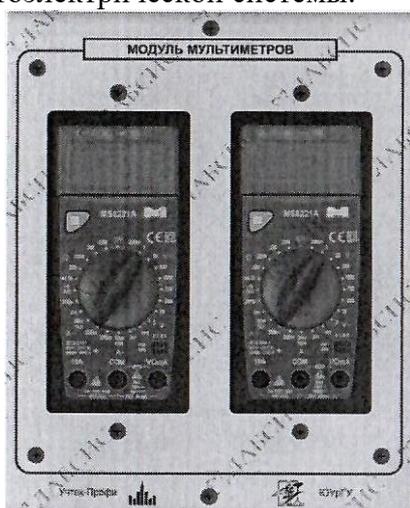


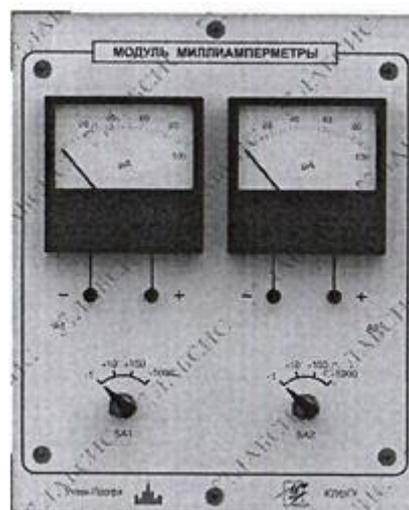
Рисунок 3.1 – Модуль «Электровакуумные приборы»

Модуль «Мультиметры» (рисунок 3.2 а) включает с себя два цифровых прибора, используется в основном для измерения напряжений.

Модуль «Миллиамперметры» (рисунок 3.2 б) предназначен для выполнения измерений постоянных токов. Содержит два многопредельных миллиамперметра, выполненных на основе микроамперметров типа М42300, 0 – 100 мкА магнитоэлектрической системы.



а



б

Рисунок 3.2 – Модуль «Мультиметры» (а) и модуль «Миллиамперметры» (б)

Изменение пределов измерения в 10, 100, 1000 раз производится с помощью

переключателей SA1 и SA2.

**Внимание! Подключение миллиамперметров в параллельные цепи, как вольтметры, может вывести приборы из строя!**

#### 4 Порядок выполнения работы

1 Выписать из приложения 1 паспортные данные макета диодного промежутка.

2 Рассчитать и построить кривую максимально допустимой мощности, рассеиваемой на аноде мощности.

3 Собрать схему для снятия анодных характеристик диодного промежутка (рисунок 4.1).

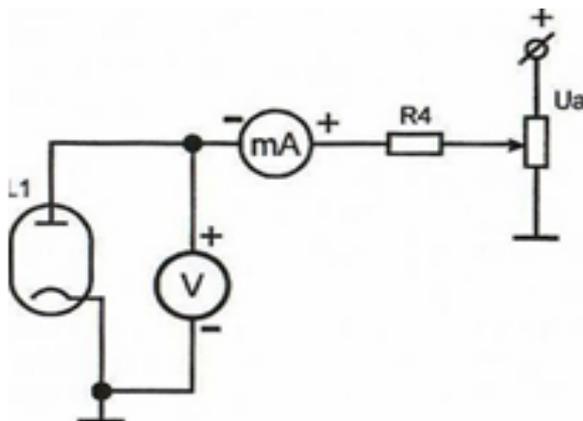


Рисунок 4.1 – Схема снятия анодных характеристик диодного промежутка

Сборка схемы исследований производится при отключенном источнике питания стенда. Схема может быть включена только после проверки ее преподавателем.

а) Соединить перемычками гнезда: X5 – X20, X32 – 25. Резистор R4 используется для ограничения протекающего через диод тока во избежание выхода последнего из строя. Для измерения анодного тока включить многопредельный миллиамперметр (модуль «Миллиамперметры») на пределе « $\times 100$ » (максимальный ток 10 мА) между гнездами X14 – X4. Для измерения анодного напряжения между гнездами X4, X20 включить мультиметр (модуль «Мультиметры») в режиме измерения постоянного напряжения «V= $\Rightarrow$ ».

Включить питание стенда.

б) снять анодную характеристику диодного промежутка. Для этого потенциометром  $U_a$  изменяя напряжение, прикладываемое к диодному промежутку, фиксировать анодный ток  $I_a$  и анодное напряжение  $U_a$  на диоде VL1.

После выполнения эксперимента выключить питание модуля. Ручку потенциометра  $U_a$  установить в положение «0». Разборку схемы следует выполнять только после того, как результаты работы на ней будут признаны преподавателем удовлетворительными.

#### Обработка результатов измерений

1. Рассчитать и построить кривую предельной мощности, рассеиваемой на аноде в системе координат  $U_a, I_a$ .

2. Построить график зависимости  $I_a = f(U_a)$ .

3. Рассчитать по характеристикам параметры  $S, R_i, R_o$ .

#### 5 Контрольные вопросы

1. Что такое вакуумный диодный промежуток?

2. В чем состоит отличие статической и динамической характеристики?

3. Объясните назначение измерительных приборов для экспериментальных исследований диодного промежутка.

4. Объясните вид анодной характеристики лампового диода.
5. Каково назначение сопротивления  $R_4$  в опыте снятия анодных характеристик диодного промежутка?
6. По экспериментальным результатам проверьте, как соответствует анодная характеристика диодного промежутка в режиме ограничения тока пространственным зарядом закону «степени  $3/2$ ».
7. Что такое время пролета электронов в диодном промежутке и на что оно влияет?

## 6 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. паспортные данные – основные параметры макета диодного промежутка (диода);
2. схему для исследования характеристики диодного промежутка;
3. анодную характеристику диодного промежутка;
4. результаты расчетов;
5. выводы.

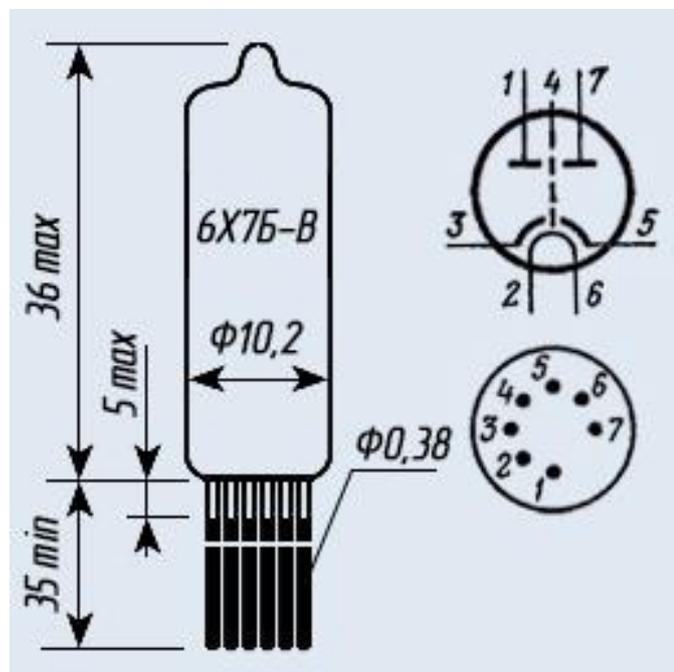
Структура отчета:

1. титульный лист;
2. введение;
3. описание установки; методики эксперимента;
4. основные расчетные формулы;
5. результаты работы и их анализ;
6. выводы.

## 7 Список рекомендуемой литературы

1. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высш. школа, 1979. – 448 с.
2. Сушков А.Д. Вакуумная электроника. Физико-технические основы: учебное пособие / А. Д. Сушков. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 464 с.
3. Щука, А. А. Электроника в 4 ч. Часть 1. Вакуумная и плазменная электроника: учебник для вузов / А. А. Щука, А. С. Сигов; под редакцией А. С. Сигова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. — 172 с.

**Приложение 1**  
(справочное)  
**Основные и предельные параметры диода 6Х7Б-В**



**6Х7Б-В**

Сверхминиатюрный двойной диод повышенной надежности и механической прочности в стеклянном оформлении с гибкими выводами.

Предназначен для работы в качестве детектора и маломощного выпрямителя.

Двойной диод 6Х7Б-В применяется в различных радиотехнических устройствах специального назначения.

Катод оксидный косвенного накала.

Работает в любом положении.

Выпускается в стеклянном сверхминиатюрном оформлении.

Цоколь выводной проволочный с 8 выводами.

Габаритные размеры двойного диода 6Х7Б-В:

- высота лампы - 36 мм;
- диаметр лампы - 10,2 мм;
- длина выводов - не менее 40 мм;
- диаметр выводов - 0,4 мм.

Масса не более 4 г.

Минимальная наработка - 500 ч.

Расшифровка маркировки двойного диода: 6Х7Б-В

6 - число, указывающее округлённое значение напряжение накала лампы в вольтах;

Х - буква, определяющая тип лампы: Х - двойной диод;

7 - число порядкового номера разработки данного типа лампы;

Б - буква, характеризующая конструктивное оформление: Б - сверхминиатюрные, в стеклянной оболочке, диаметром от 8 до 10,5 мм;

В - лампа повышенной надежности и механической прочности.

Технические характеристики и электрические параметры лампы 6Х7Б-В:

Номинальные электрические характеристики:	
Напряжение накала, В	6,3
Ток накала, мА	300 ± 30
Начальный ток каждого диода, мкА	не более 20
Эффективное напряжение на аноде каждого диода, В	165
Выпрямленный ток каждого диода, мА	Не менее 8
Предельно допустимые электрические параметры:	
Наибольшее напряжение накала, В	6,9
Наименьшее напряжение накала, В	5,7
Наибольшая амплитуда обратного напряжения на аноде каждого диода, В	450
Наибольшая мощность, рассеиваемая на аноде каждого диода, Вт	0,2
Наибольшее напряжение между катодом и подогревателем, В	200
Оформление	Стеклое миниатюрное