

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ПРИКЛАДНОЙ  
ИНФОРМАТИКИ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 201М-10

---

**Вольт-амперные и температурные  
характеристики полупроводниковых  
диодов**

---

*Работу выполнил*  
Ринат Валиев, 711 гр.

*Под руководством*  
Д.Н. Щелкунова

# Оборудование

В работе используется набор диодов №2.

Импульсный ВЧ диод	Выпрямительный НЧ диод	Выпрямительный диод Шоттки	Варикап	Стабилитрон
D1N4149	D1N4002	D1N5818	D1N5443A	D04AZ2_2

Таблица 1: Диоды, содержащиеся в используемом наборе

Приведем некоторые характеристические параметры для диодов из таблицы 1.

**D1N4149:**  $I_s=2.682n$   $N=1.836$   $R_s=.5664$   $I_{kf}=44.17m$   $X_{ti}=3$   $E_g=1.11$   $C_{jo}=2p$   $M=.3333$   $V_j=.5$   $F_c=.5$   $I_{sr}=1.565n$   $N_r=2$   $B_v=100$   $I_{bv}=100u$   $T_t=11.54n$

**D1N4002:**  $I_s=14.11E-9$   $N=1.984$   $R_s=33.89E-3$   $I_{kf}=94.81$   $X_{ti}=3$   $E_g=1.110$   $C_{jo}=51.17E-12$   $M=.2762$   $V_j=.3905$   $F_c=.5$   $I_{sr}=100.0E-12$   $N_r=2$   $B_v=100.1$   $I_{bv}=10$

**D1N5818:**  $I_s=2.835u$   $R_s=47.12m$   $I_{kf}=.3227$   $N=1$   $X_{ti}=0$   $E_g=1.11$   $C_{jo}=359.3p$   $M=.6513$   $V_j=.75$   $F_c=.5$   $I_{sr}=26.46u$   $N_r=2$

**D1N5443A:**  $I_s=10.51E-18$   $R_s=.1$   $I_{kf}=0$   $N=1$   $X_{ti}=3$   $E_g=1.11$   $C_{jo}=21.95p$   $M=.426$   $V_j=.75$   $F_c=.5$   $I_{sr}=12.84p$   $N_r=2$   $B_v=30$   $I_{bv}=10u$

**D04AZ2\_2:**  $R_s=1.000E-3$   $C_{jo}=1.000E-12$   $M=.3333$   $V_j=.75$   $I_{sr}=96.31E-6$   $B_v=2.260$   $I_{bv}=51.73E-3$   $T_t=5.000E-9$

Схемы<sup>1</sup> для исследования диодов:

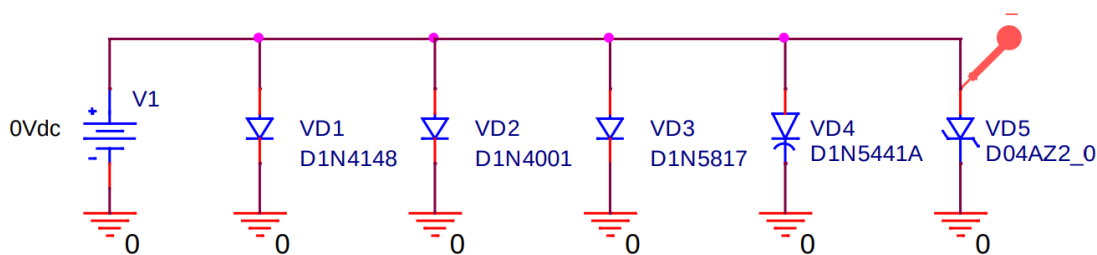


Рис. 1: Схема последовательного включения диодов

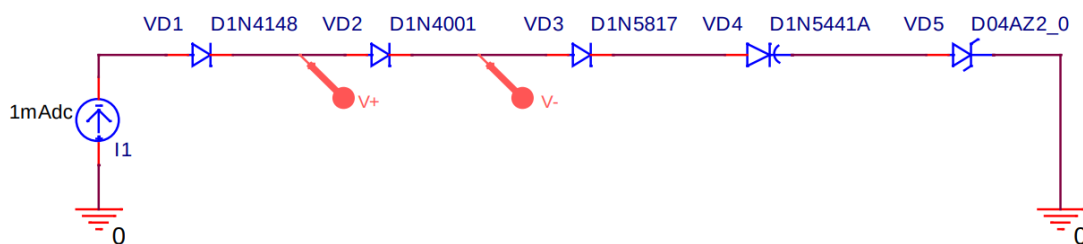


Рис. 2: Схема параллельного включения диодов

<sup>1</sup>Диоды аналогичны указанным в наборе из таблицы 1

## 2.1. Вольт-амперные характеристики

### Температурная зависимость обратной ветви ВАХ диода

$$I_{\text{обр}} = f(U_d, T = \text{const})$$

**2.1.1.** Получим зависимость токов заданного набора диодов от напряжения в диапазоне от  $-1V$  до  $0.05V$  с шагом  $1mV$  при температурах 17, 27, 37 градусов Цельсия. Для температуры  $T = 27^\circ C$  запишем на графике каждого диода значение обратного тока при напряжении  $U_d = -0.1V$ . Сравним с паспортными данными.

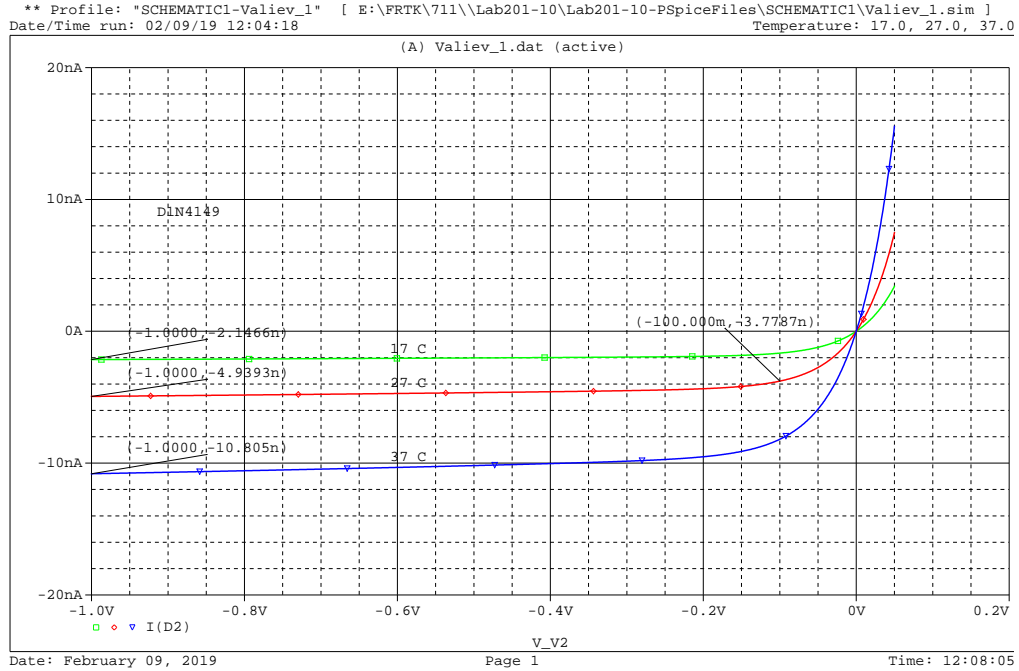


Рис. 3: D1N4149:  $I_{\text{обр}} = -3.7787 \text{ nA}$

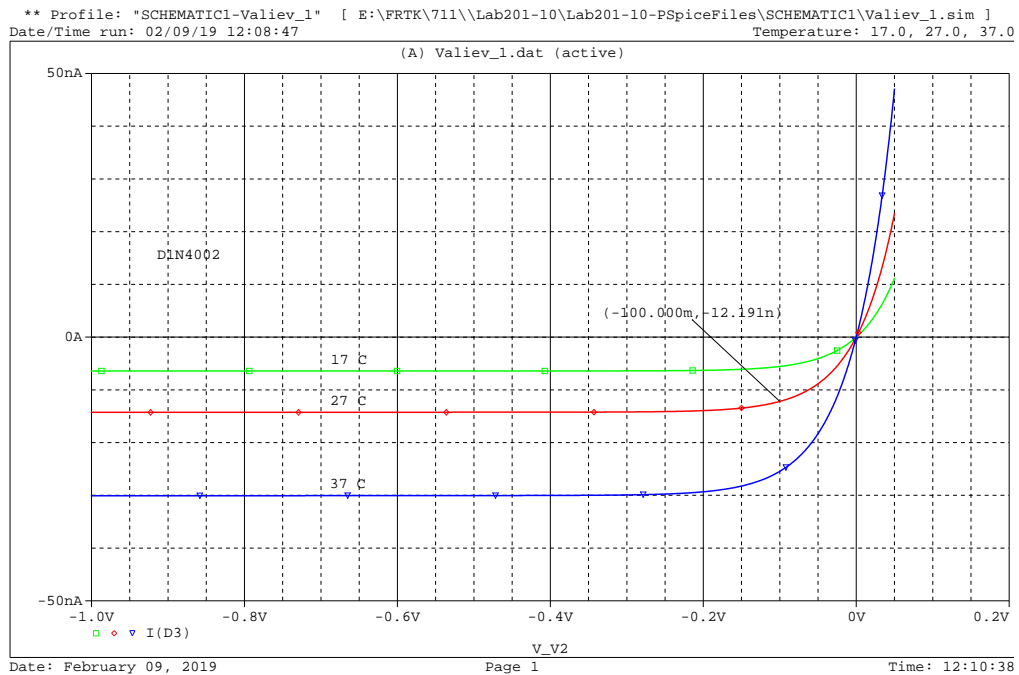


Рис. 4: D1N4002:  $I_{\text{обр}} = -12.191 \text{ nA}$

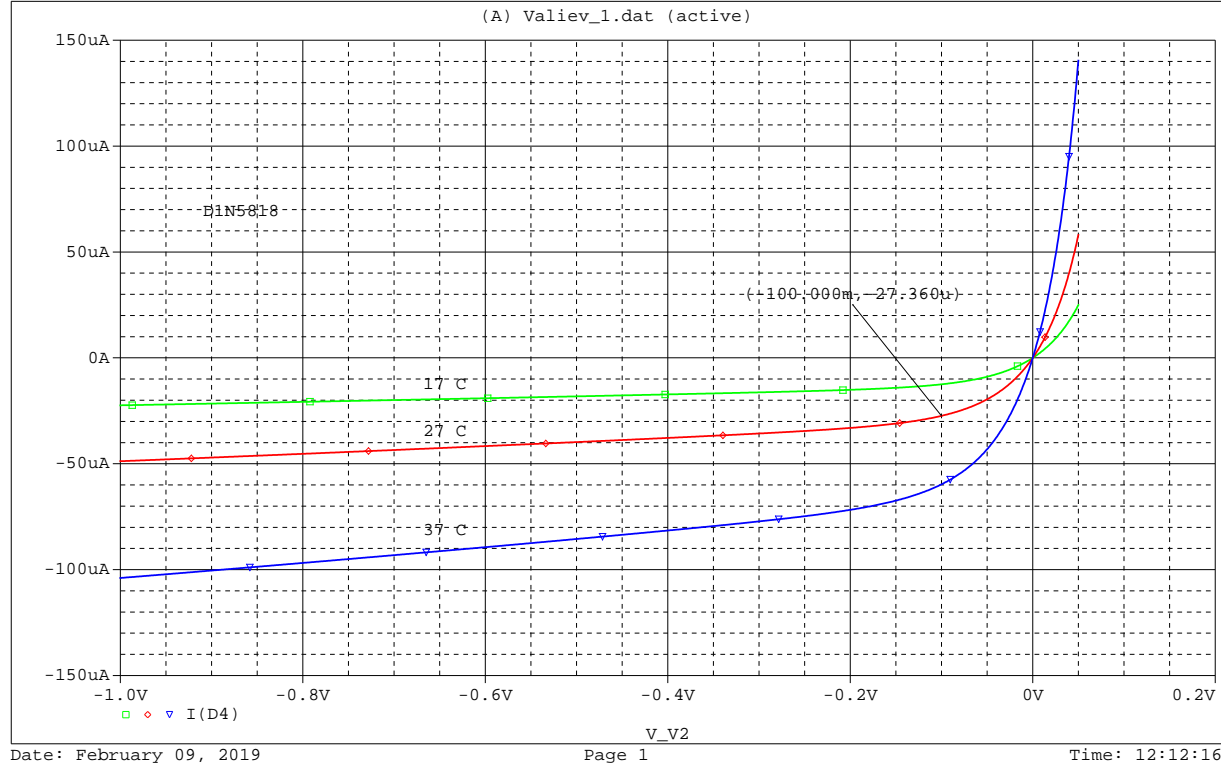


Рис. 5: D1N5818:  $I_{o6p} = -27.360 \text{ uA}$

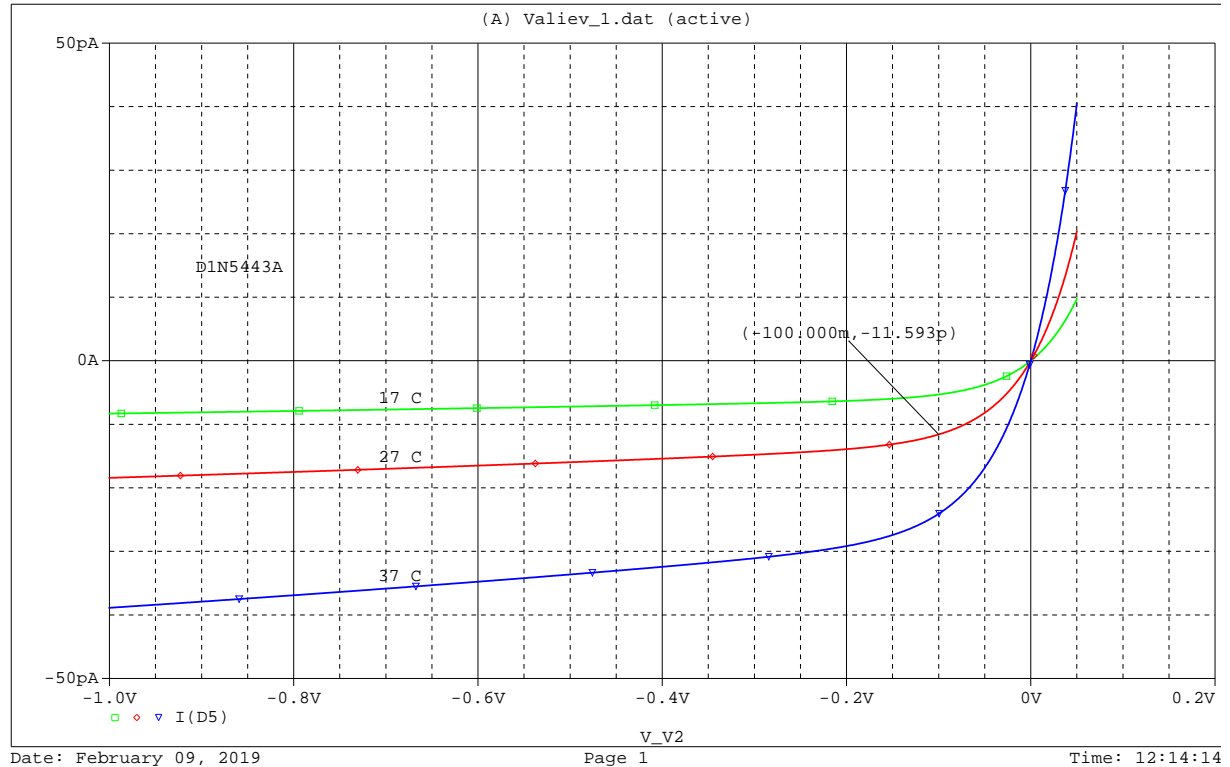


Рис. 6: D1N5443A:  $I_{o6p} = -11.593 \text{ pA}$

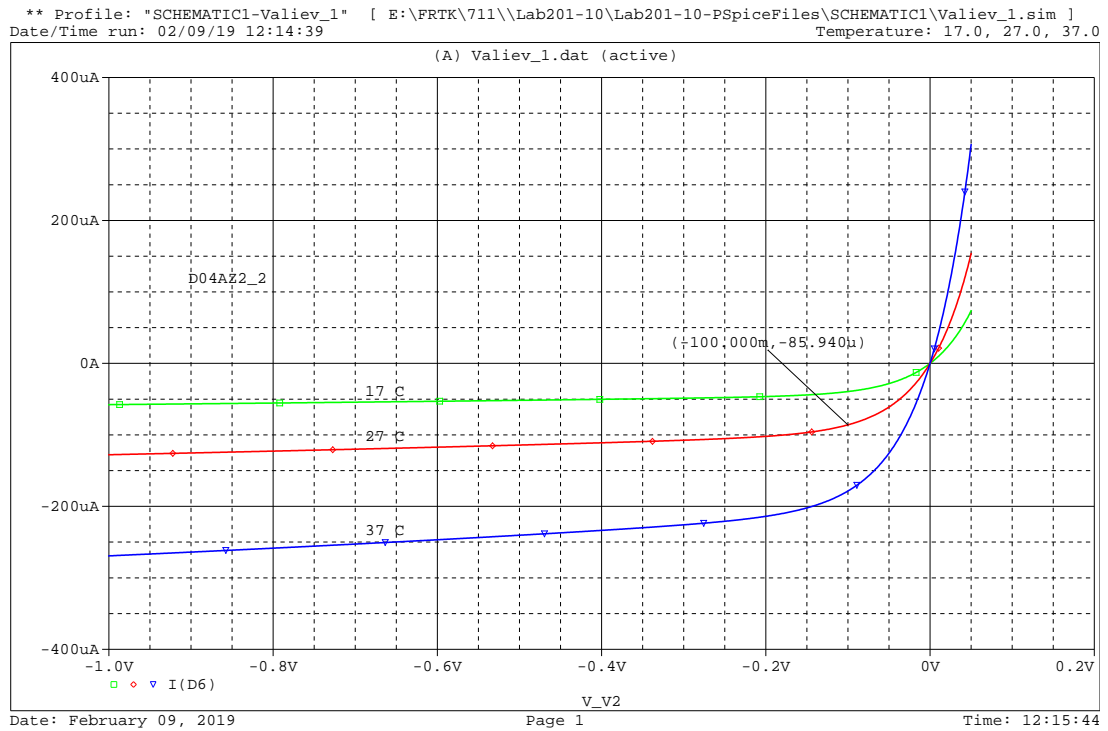


Рис. 7: D04AZ2\_2:  $I_{обp} = -85.940 \text{ uA}$

**2.1.1.a.** Для импульсного ВЧ диода напечатаем значения обратных токов также для напряжения  $U_d = -1V$  и рассчитаем абсолютный и относительный температурные коэффициенты обратного тока для температуры  $T = 27^\circ C$ :

$$\text{абс. ТКOT} = \left( \frac{\partial I_{обp}(T)}{\partial T} \right)_U [A/^\circ C] \quad \text{относ. ТКOT} = \frac{\text{абс. ТКOT}(T)}{I_{обp}(T)} \cdot 100 [\%/^\circ C]$$

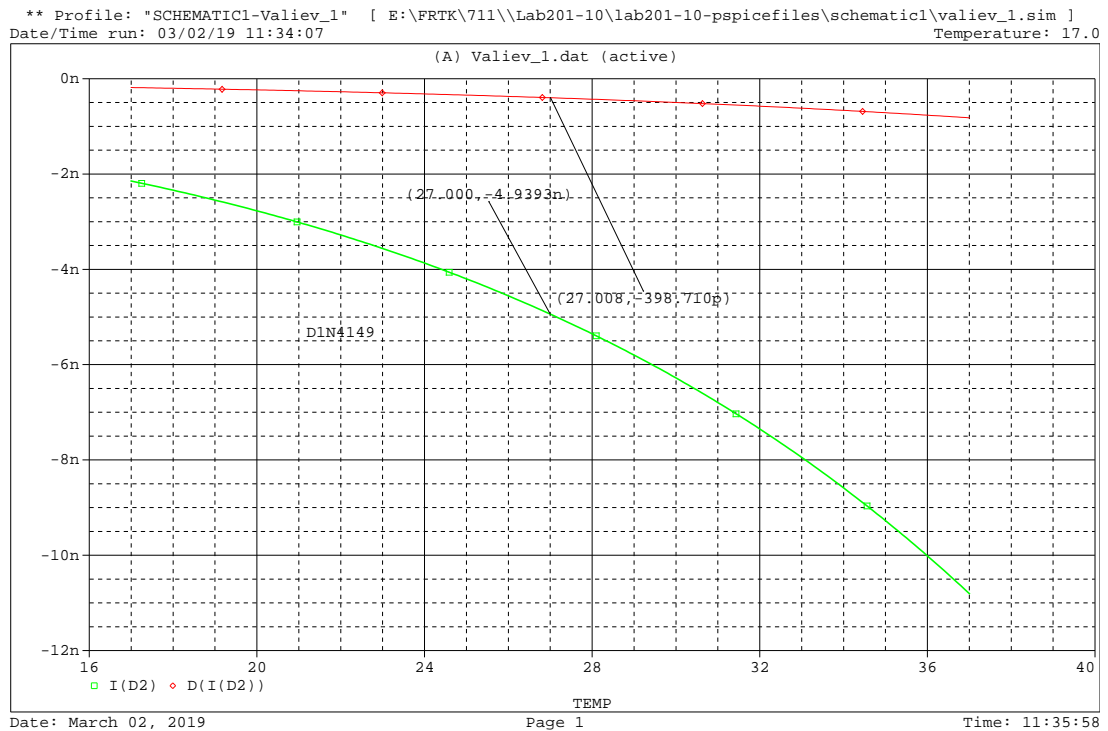


Рис. 8: D1N4149: абс.ТКОТ =  $-398.710 \text{ pA}/^\circ C$  и относ. ТКOT =  $8 \text{ } \%/^\circ C$

**2.1.1.б.** Рассчитаем обратный ток диода при  $T = 47^\circ\text{C}$ , используя примерную температуру удвоения  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ .

$$I_{\text{обр}}(T = 47^\circ\text{C}) = I_{\text{обр}}(T = 27^\circ\text{C}) \cdot 4 = -3.7787 \text{ nA} \cdot 4 = 15.1148 \text{ nA}$$

**2.1.1.в.** Рассчитаем фактическую температуру удвоения  $\Delta T_{\text{факт}}$ .

$$\Delta T_{\text{факт}} = \Delta T \cdot \frac{0.693}{\ln N} = 9.98^\circ\text{C} \quad \text{где } N = \frac{I_{\text{обр}}(T + \Delta T)}{I_{\text{обр}}(T)}$$

### Температурная зависимость прямой ветви ВАХ диода

$$I_{\text{пр}} = f(U_d, T = \text{const})$$

**2.1.2.** Повторим получение токов диодов при тех же значениях температуры 17, 27, 37 градусов Цельсия, но в диапазоне положительных напряжений от  $+0.1\text{V}$  до  $+0.6\text{V}$  с шагом  $1\text{mV}$ .

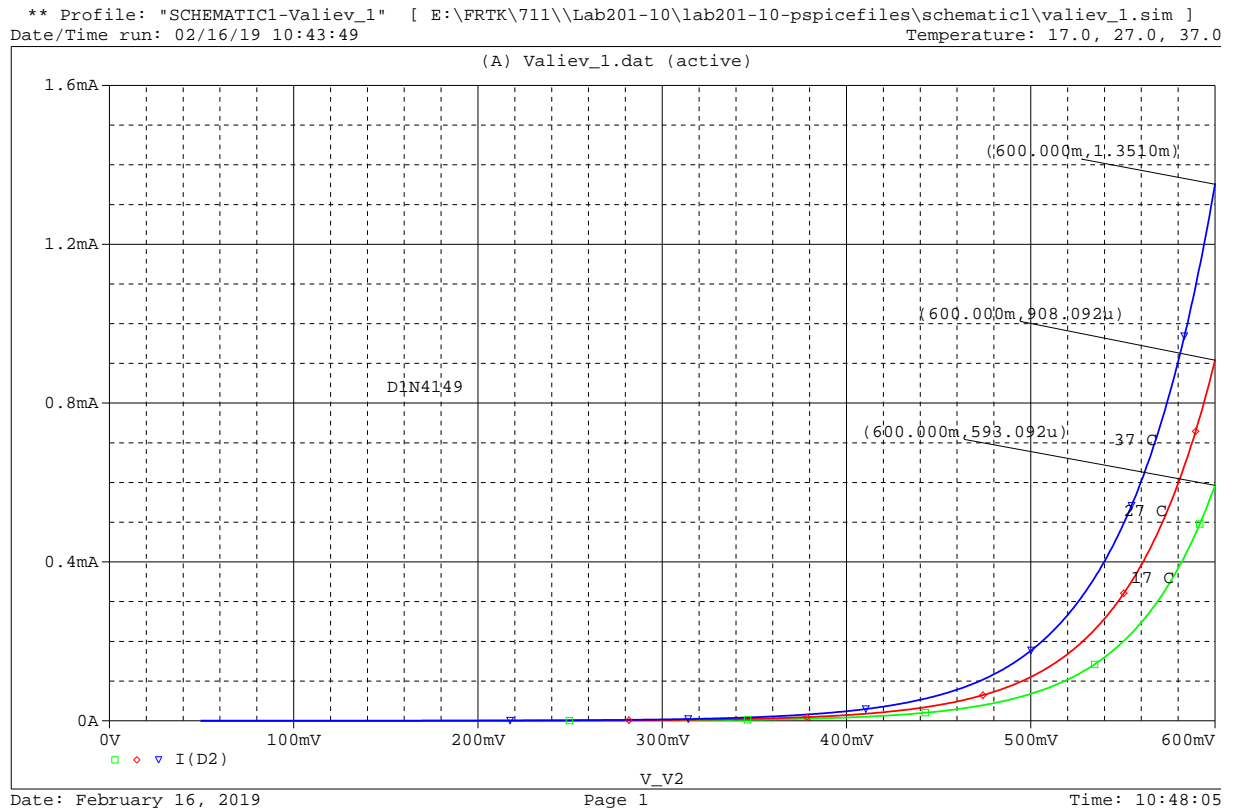


Рис. 9: D1N4149

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 02/16/19 10:48:45 Temperature: 17.0, 27.0, 37.0

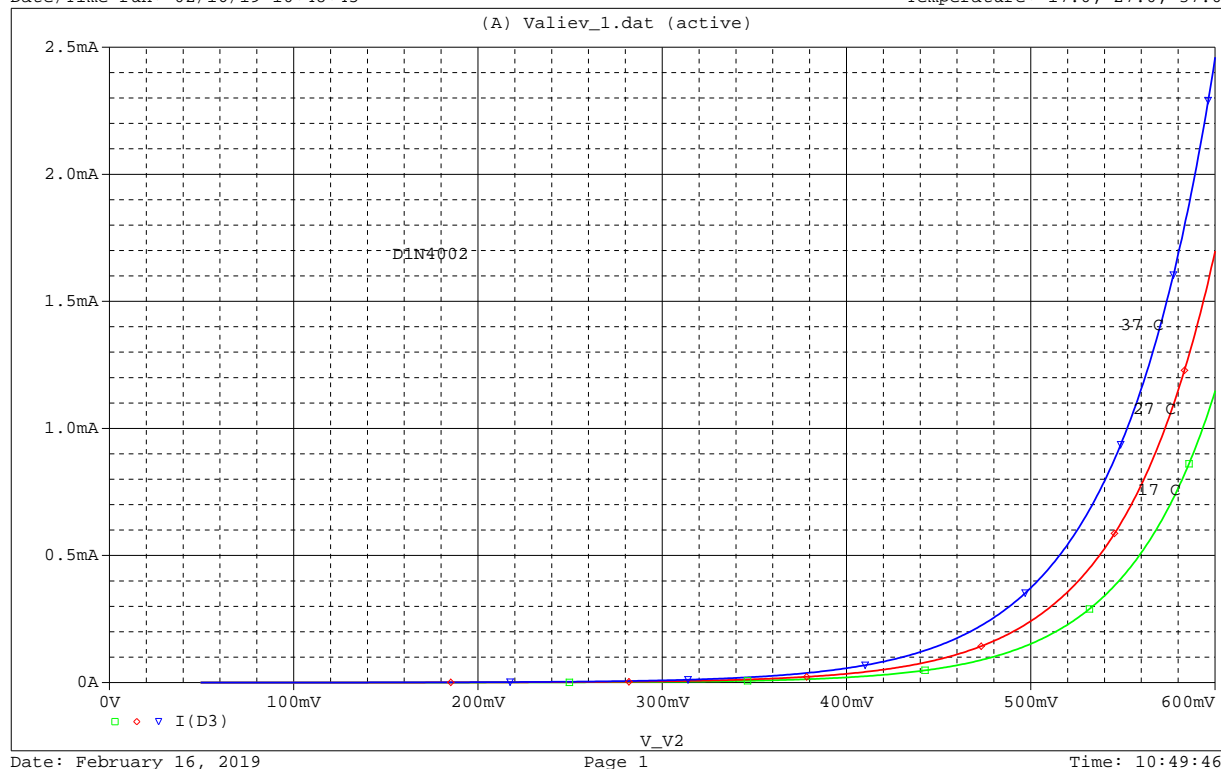


Рис. 10: D1N4002

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 02/16/19 10:50:23 Temperature: 17.0, 27.0, 37.0

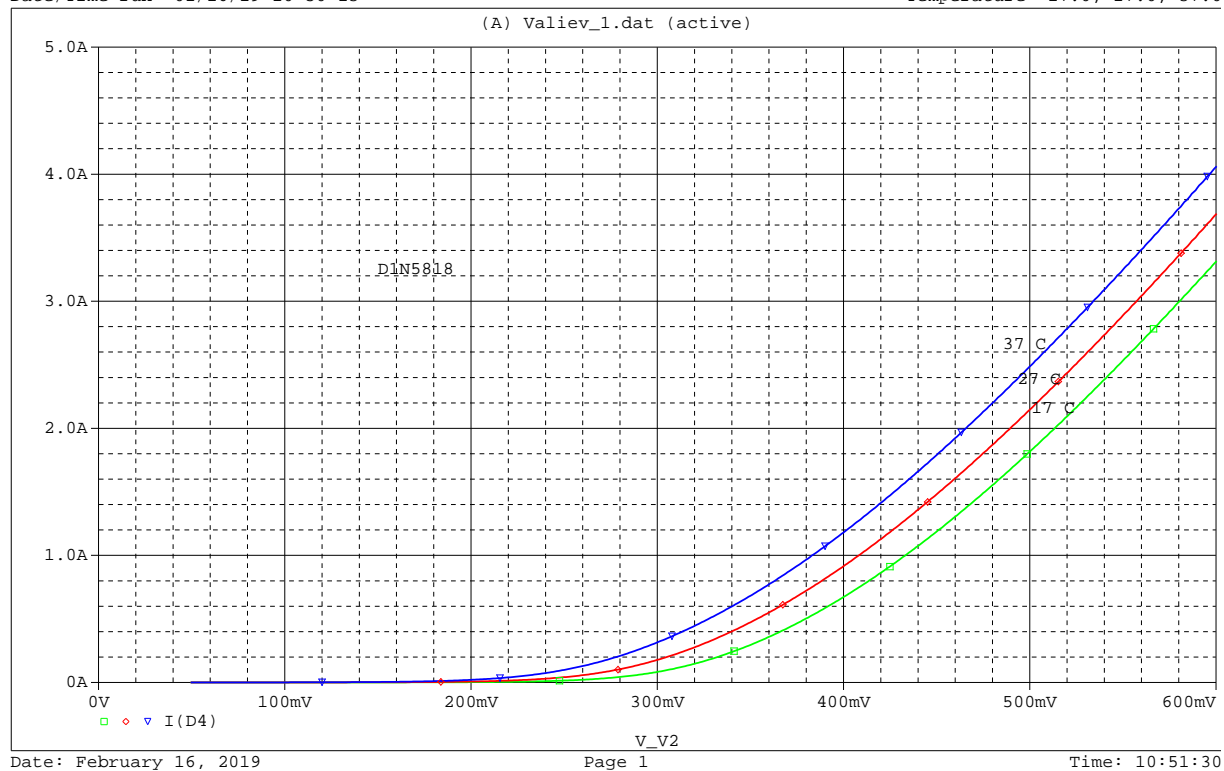


Рис. 11: D1N5818

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 02/16/19 10:51:55 Temperature: 17.0, 27.0, 37.0

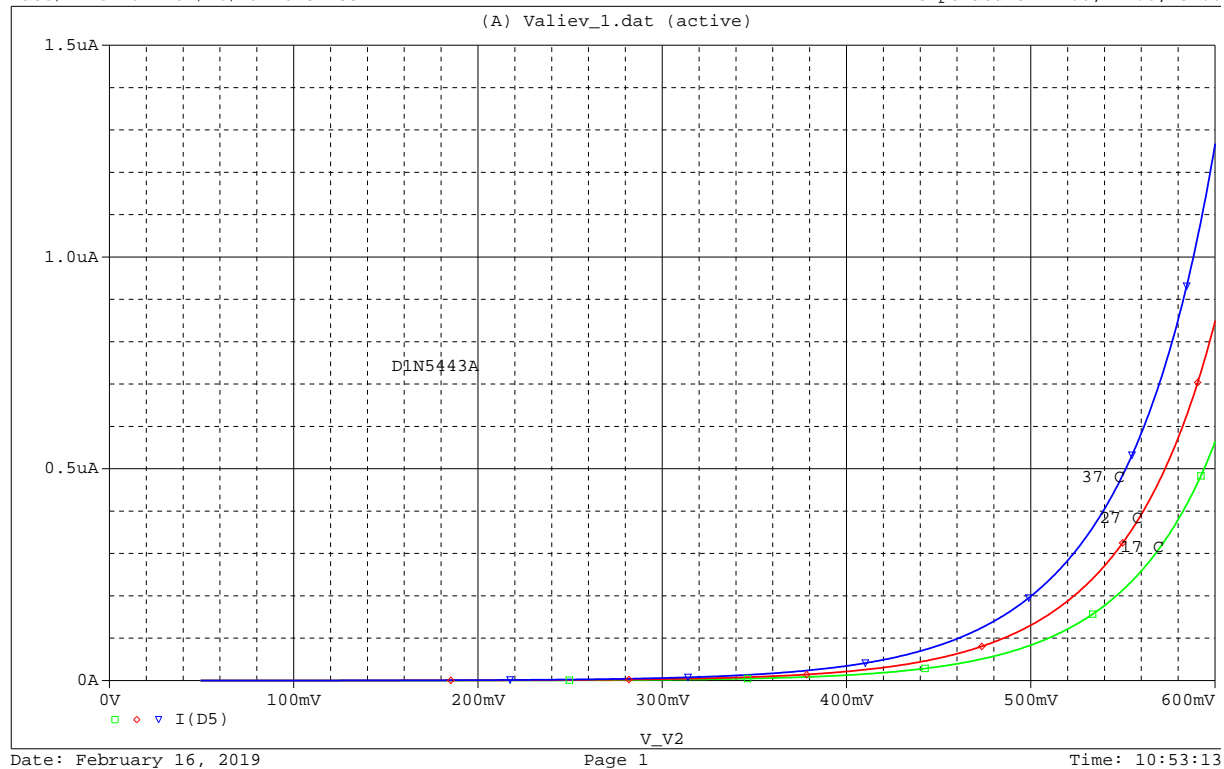


Рис. 12: D1N5443A

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 02/16/19 10:53:51 Temperature: 17.0, 27.0, 37.0

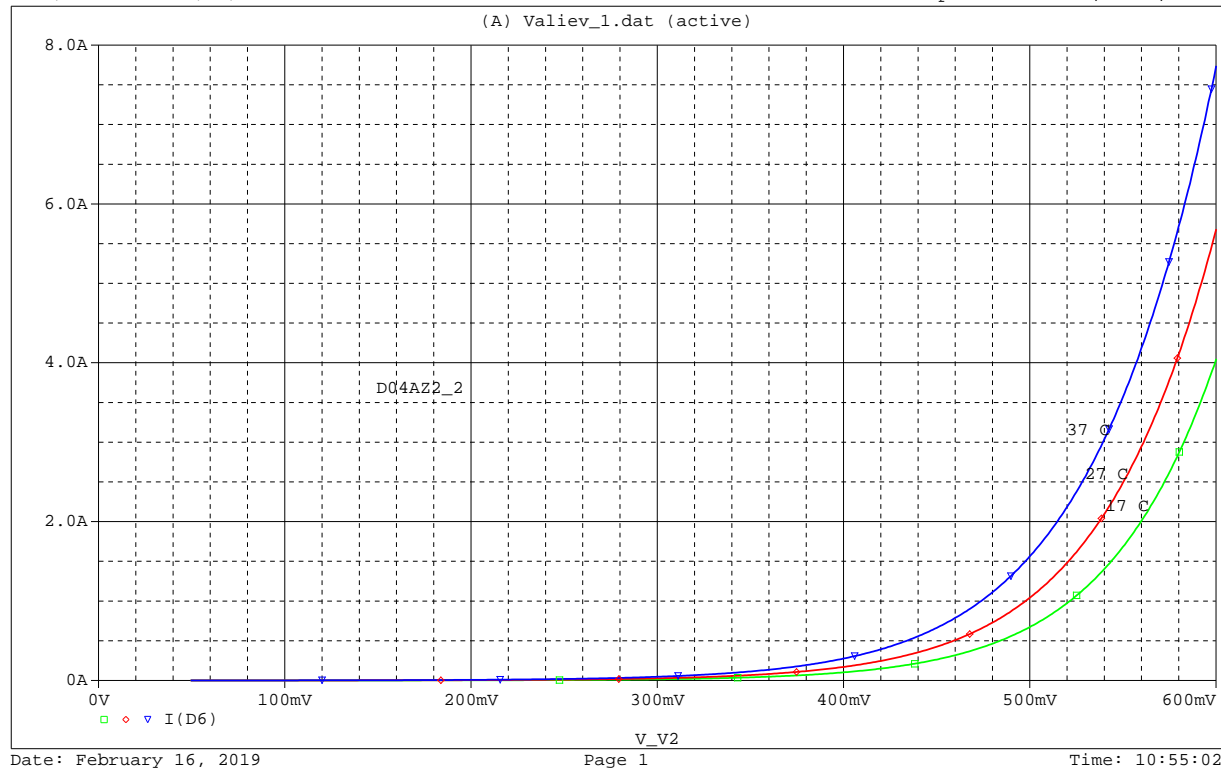


Рис. 13: D04AZ2\_2



**2.1.2.a.** Напечатаем на графике для импульсного ВЧ диода значения токов при напряжении  $U_d = 0.6V$ .

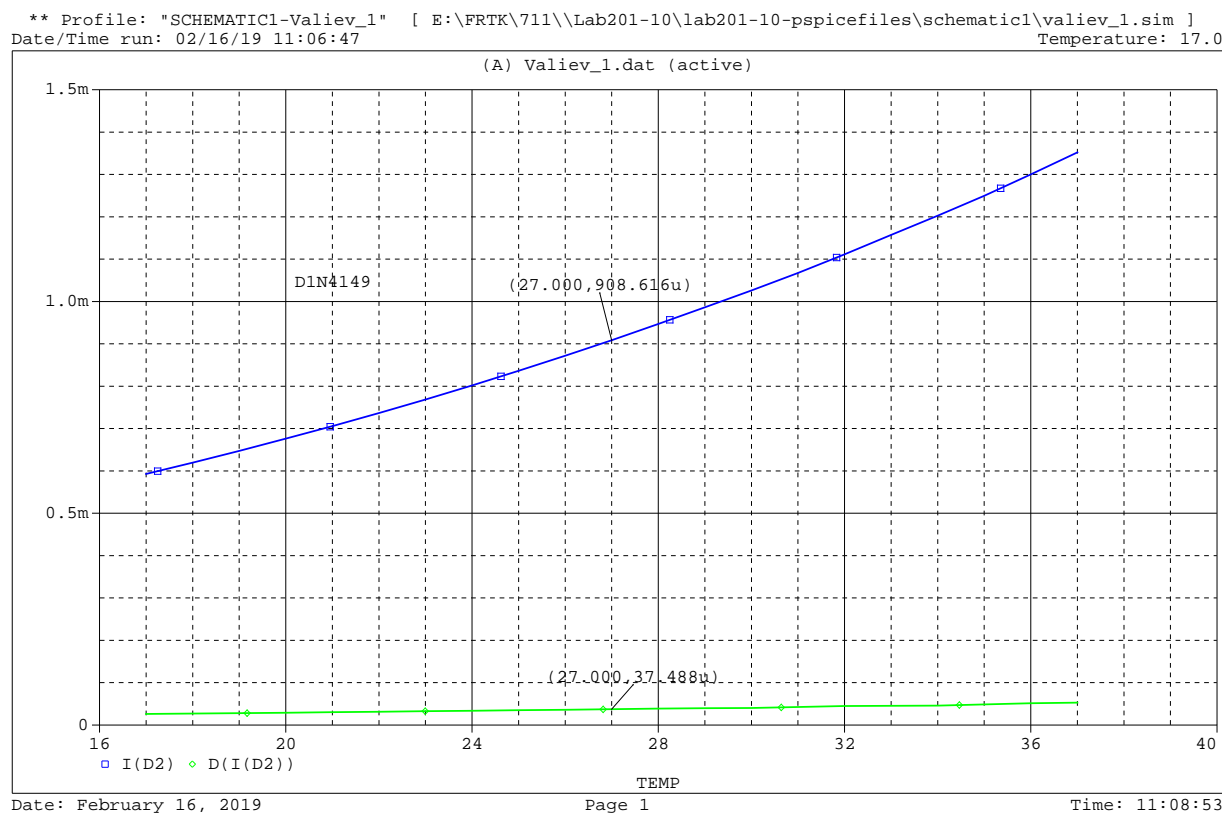


Рис. 14: D1N4149: относ. ТКOT = 4.1%

## Прямая ВАХ диода в полулогарифмических координатах

**2.1.3.** Получим на одном графике в логарифмическом масштабе зависимости токов от напряжения всех диодов заданного набора в диапазоне от  $+0.05V$  до  $+5V$  при температуре  $T = 27^{\circ}C$ .

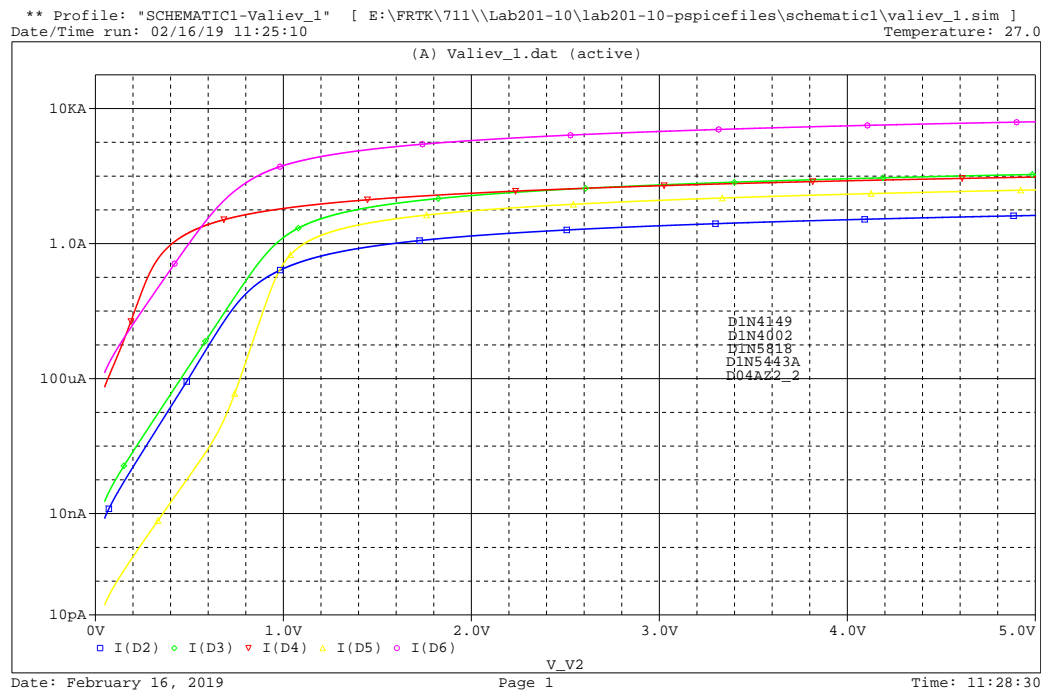


Рис. 15: Список диодов на представлен по порядку, показанному снизу для линий

**2.1.3.a.** Для импульсного ВЧ диода получим в логарифмическом масштабе семейство температурно-зависимых ВАХ прямого тока  $I_{np} = f(U_d, T = const)$  при  $-40^{\circ}C$ ,  $27^{\circ}C$ ,  $85^{\circ}C$ .

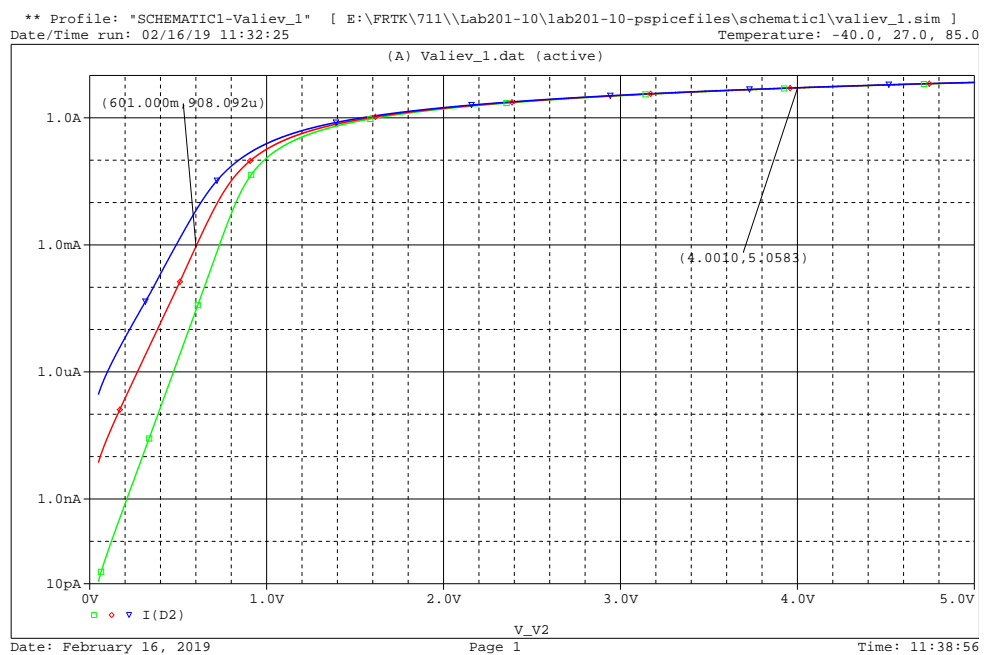


Рис. 16: ВАХ прямого тока для импульсного ВЧ диода при  $-40^{\circ}C$ ,  $27^{\circ}C$ ,  $85^{\circ}C$

Для экспоненциальной ( $U_d \approx 0.6V$ ) и линейной ( $U_D \approx 4V$ ) области ВАХ рассчитаем относительные температурные коэффициенты прямого тока при температуре  $27^\circ C$ .

$$\text{относ. ТКПТ} = \frac{\text{абс. ТКПТ}(T)}{I_{\text{пр}}(T)} \cdot 100 [\%/^\circ C]$$

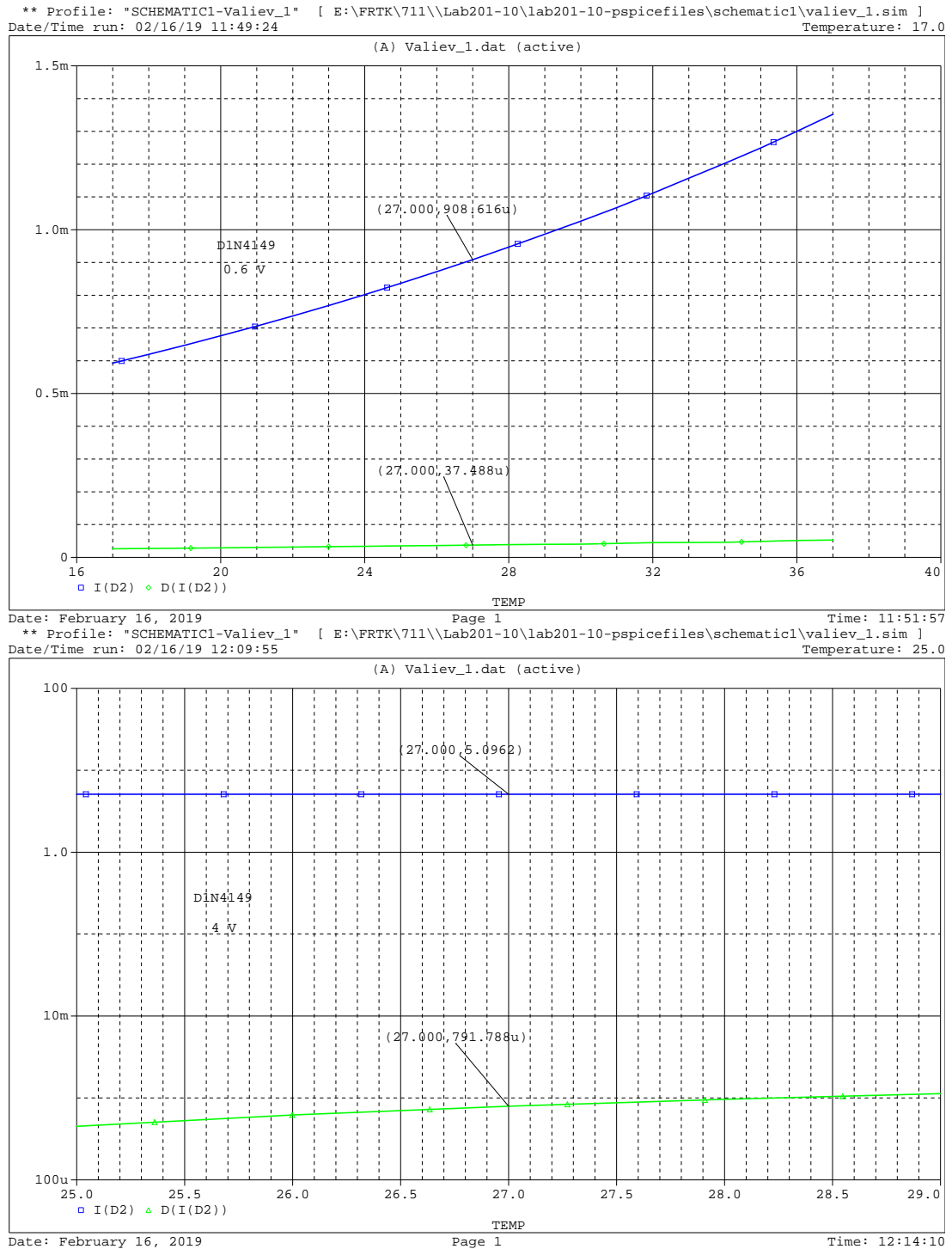


Рис. 17: Области ( $U_d \approx 0.6V \Rightarrow \text{ТКПТ} \approx 0.1\%$ )  
и ( $U_D \approx 4V \Rightarrow \text{ТКПТ} \approx 0.4\%$ )

**2.1.3.б.** Для ВАХ с параметром  $T = 27^\circ\text{C}$  в линейном масштабе определим по наклону кривой в области линейности среднее значение омического сопротивления диодной структуры.

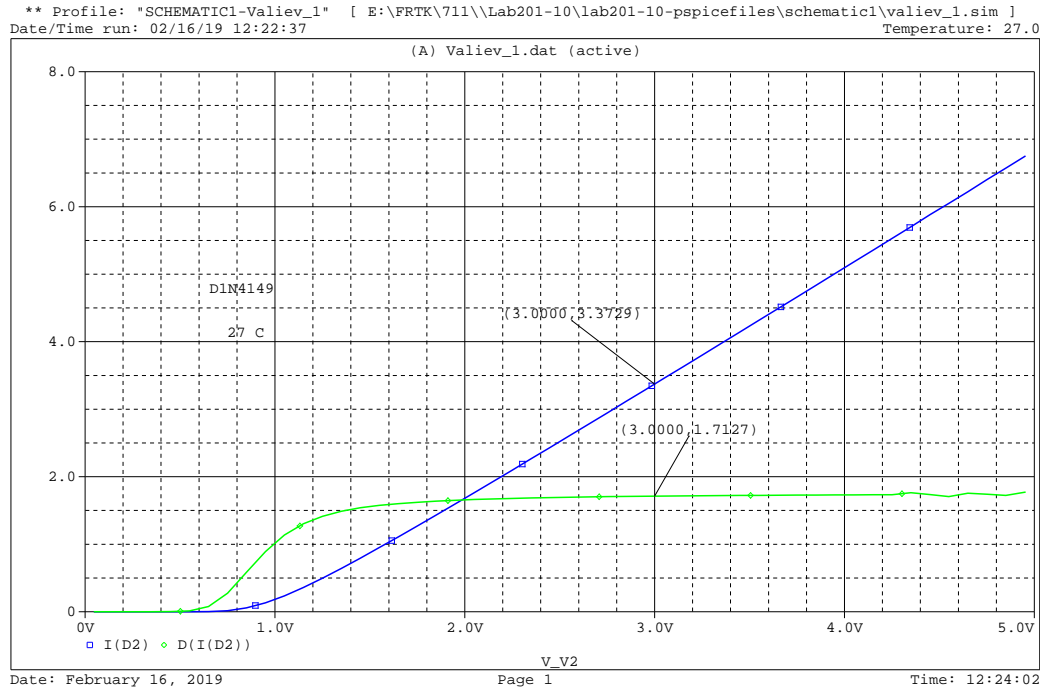


Рис. 18: Рассматривая  $\frac{1}{DIFF}$  приходим к ответу  $.5839 \approx R_s$

**2.1.3.в.** Найдем также зависимость дифференциальной проводимости.

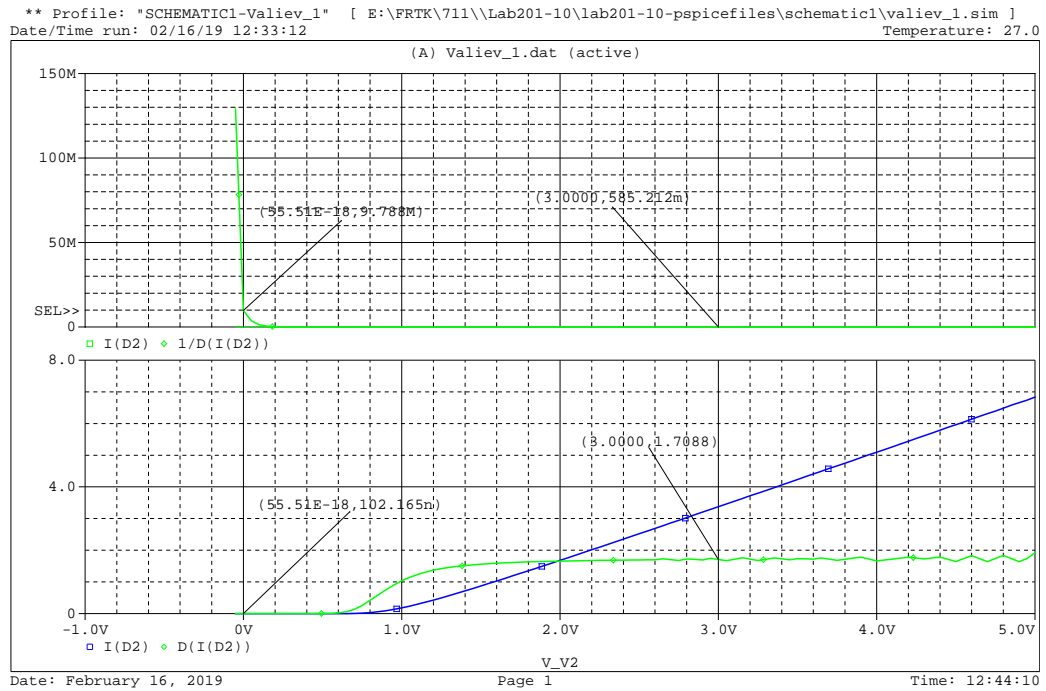


Рис. 19: Также получаем в линейной области  $.5852 \approx R_s$

При нуле получаем  $r_0 = 9.788M \Rightarrow \frac{U_T}{r_o} = 2.643n \approx I_s$

**2.1.3.г.** Для ВАХ с параметром  $T = 27^\circ\text{C}$  в линейном масштабе получим в области экспоненциальной зависимости коэффициент неидеальности при  $I_{xx} = I_s$  или  $I_{sr}$ .

$$m = \frac{U}{U_T} \bigg/ \ln \left( \frac{I + I_s}{I_s} \right) \approx \left( \frac{U}{U_T} \right) / \ln \left( \frac{I}{I_{xx}} \right)$$

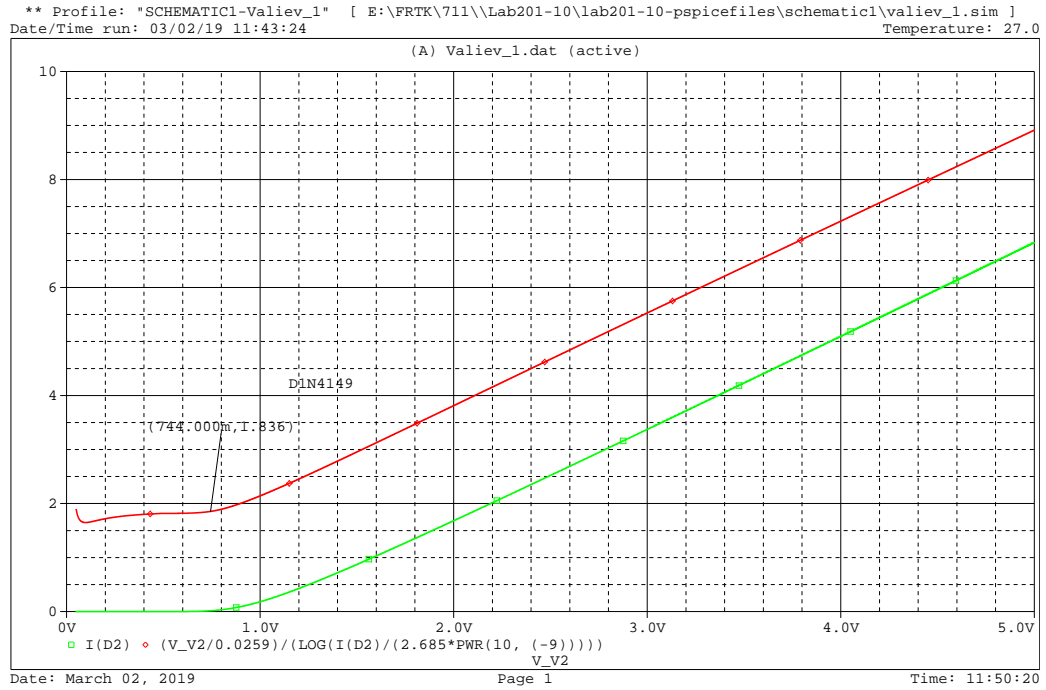


Рис. 20: Коэффициент неидеальности ( $I_s$ ) = 1.836  $\approx N$ : совпадает с паспортом

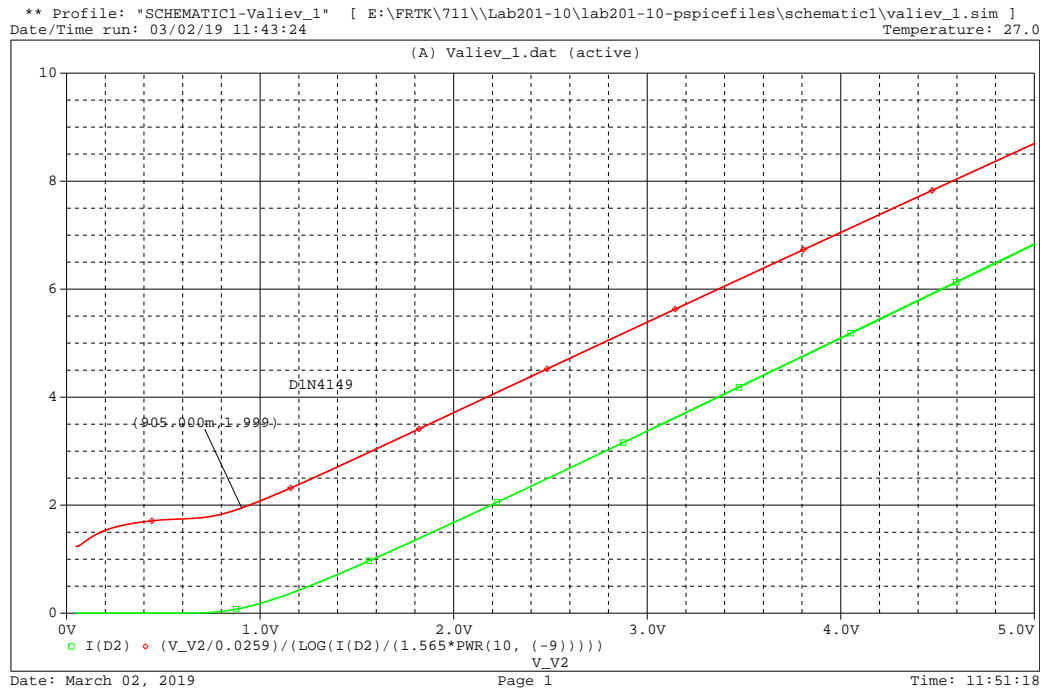


Рис. 21: Коэффициент неидеальности ( $I_{sr}$ ) = 1.999  $\approx Nr$ : совпадает с паспортом

**ВАХ стабилитрона**  $I_{стб} = f(U, T = const)$

**2.1.4.** Получим зависимости тока стабилитрона от напряжения в диапазоне от  $-(U_{st} + \Delta U)$  до  $+0.3V$  при  $-40^{\circ}C, 27^{\circ}C, 85^{\circ}C$ . Также рассмотрим это в малой окрестности напряжения стабилизации.

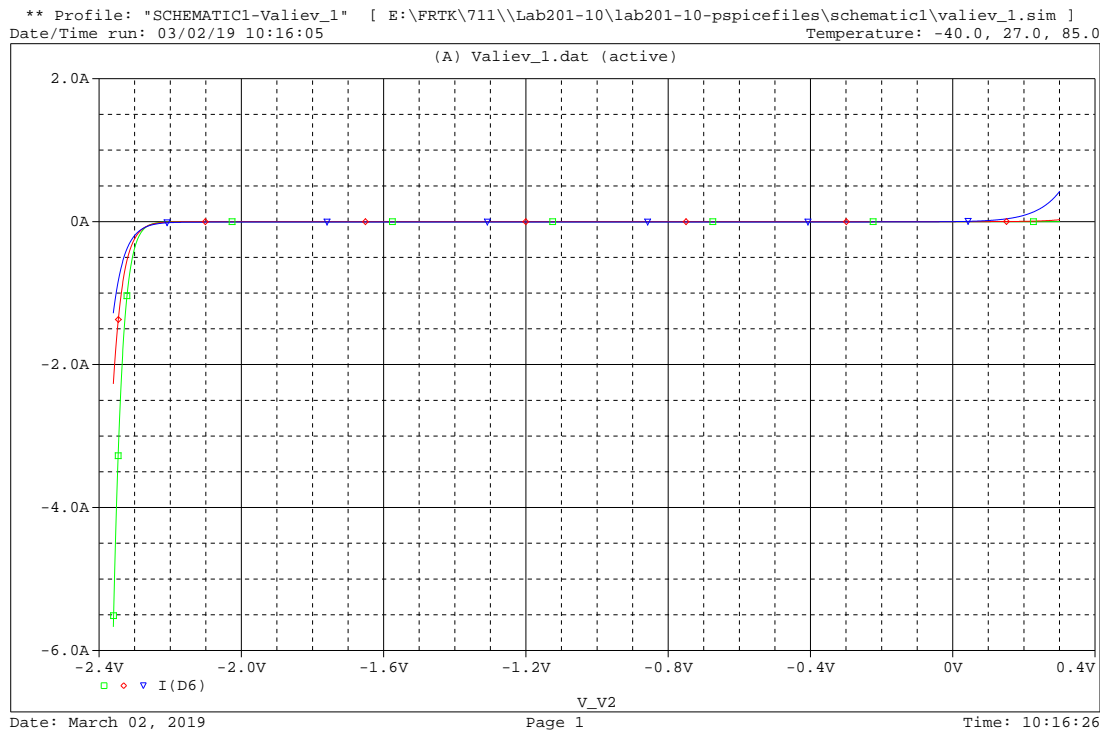


Рис. 22: ВАХ стабилитрона

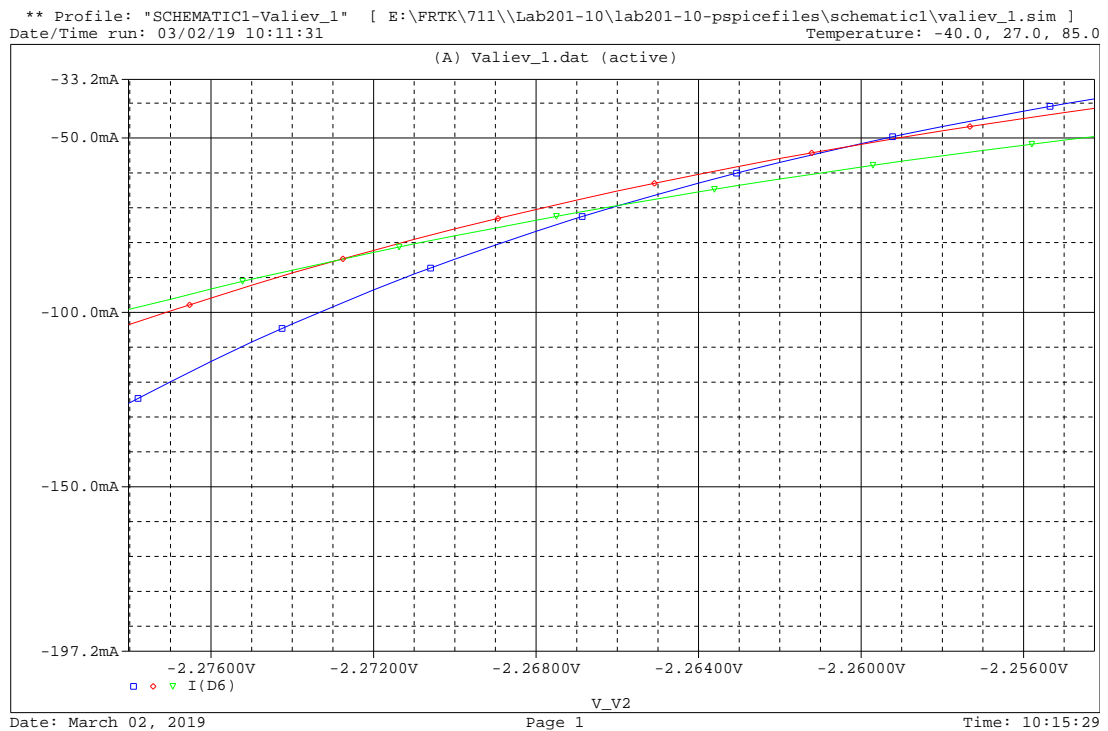


Рис. 23: ВАХ стабилитрона вблизи напряжения стабилизации

## Обратная ветвь ВАХ реального диода

**2.1.5.** Отсоединим стабилитрон от источника и получим зависимости токов диодов от напряжения в диапазоне от  $-(30 - 60)V$  до  $+0.05V$  при  $T = 27^\circ C$ .

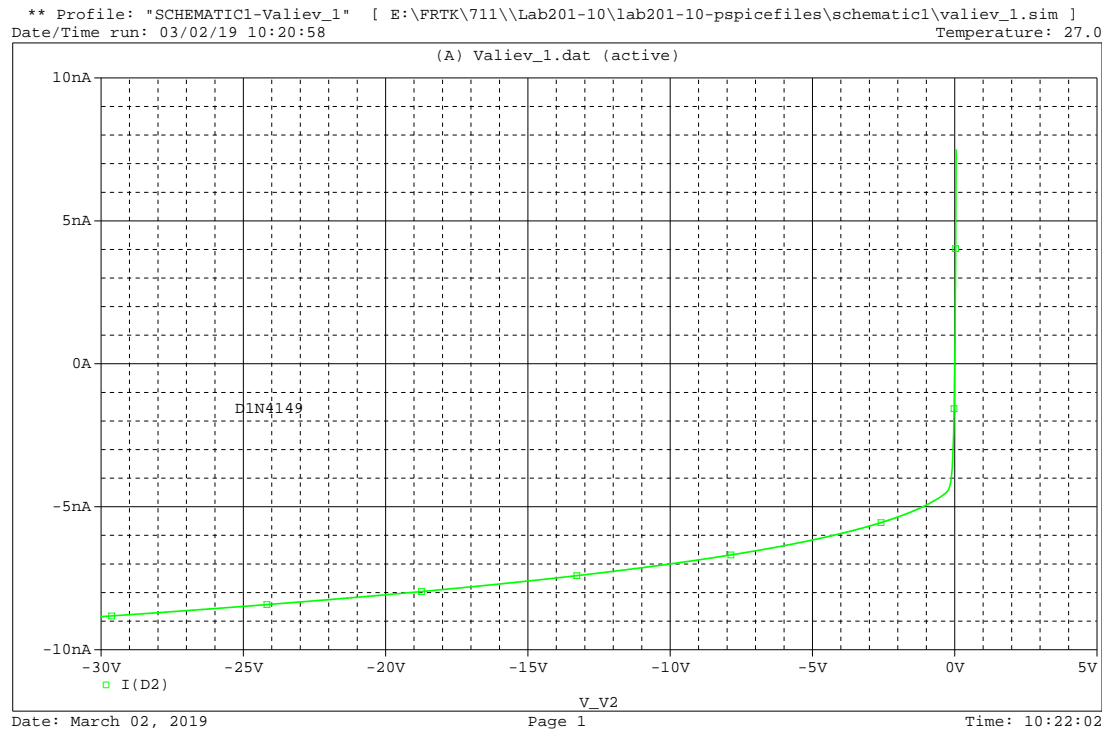


Рис. 24: D1N4149

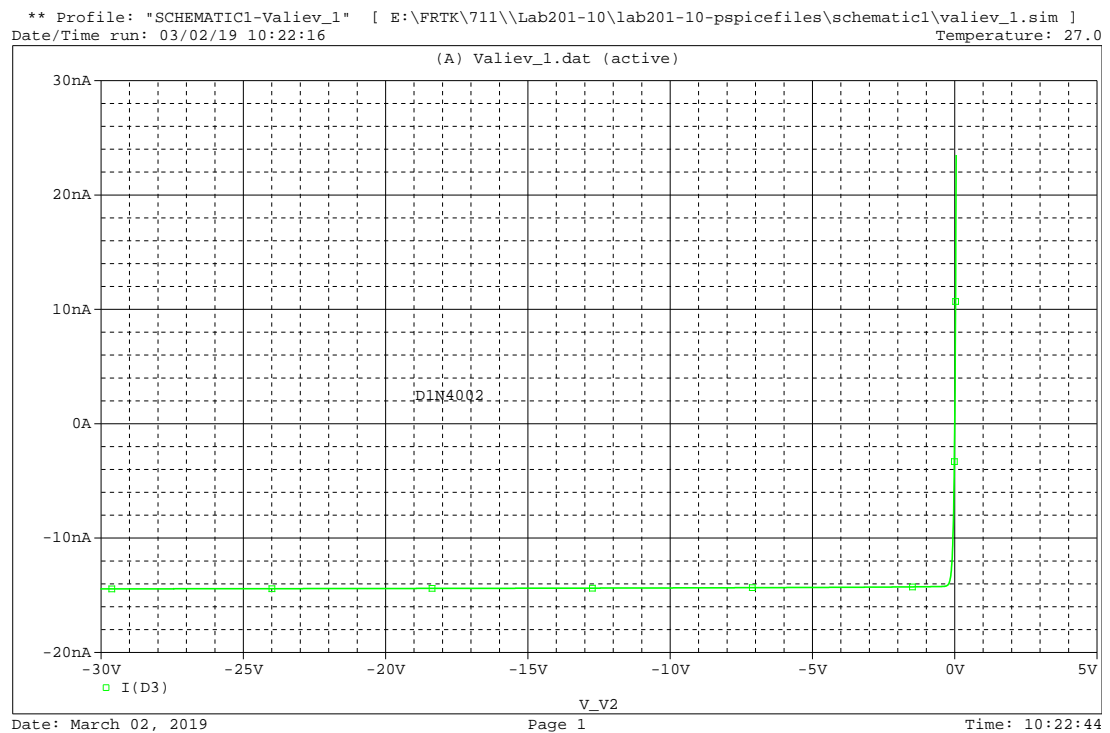


Рис. 25: D1N4002

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 03/02/19 10:23:15 Temperature: 27.0

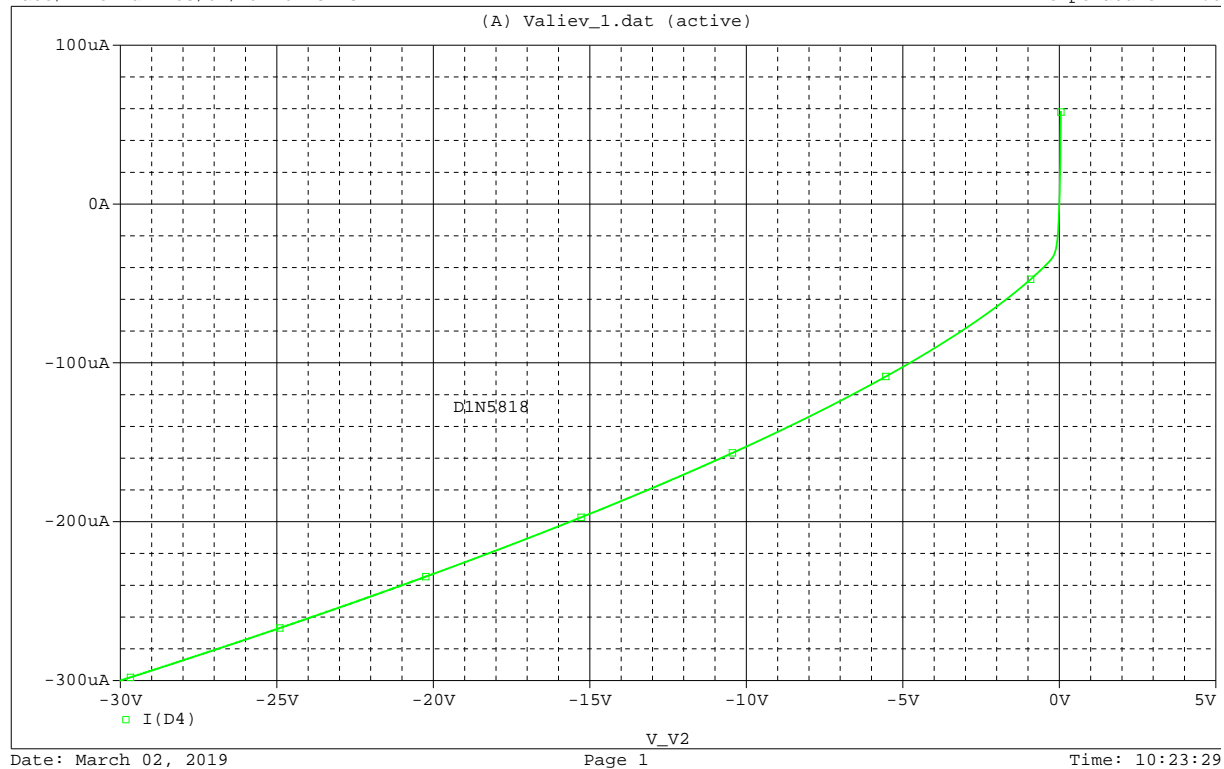


Рис. 26: D1N5818

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 03/02/19 10:23:48 Temperature: 27.0

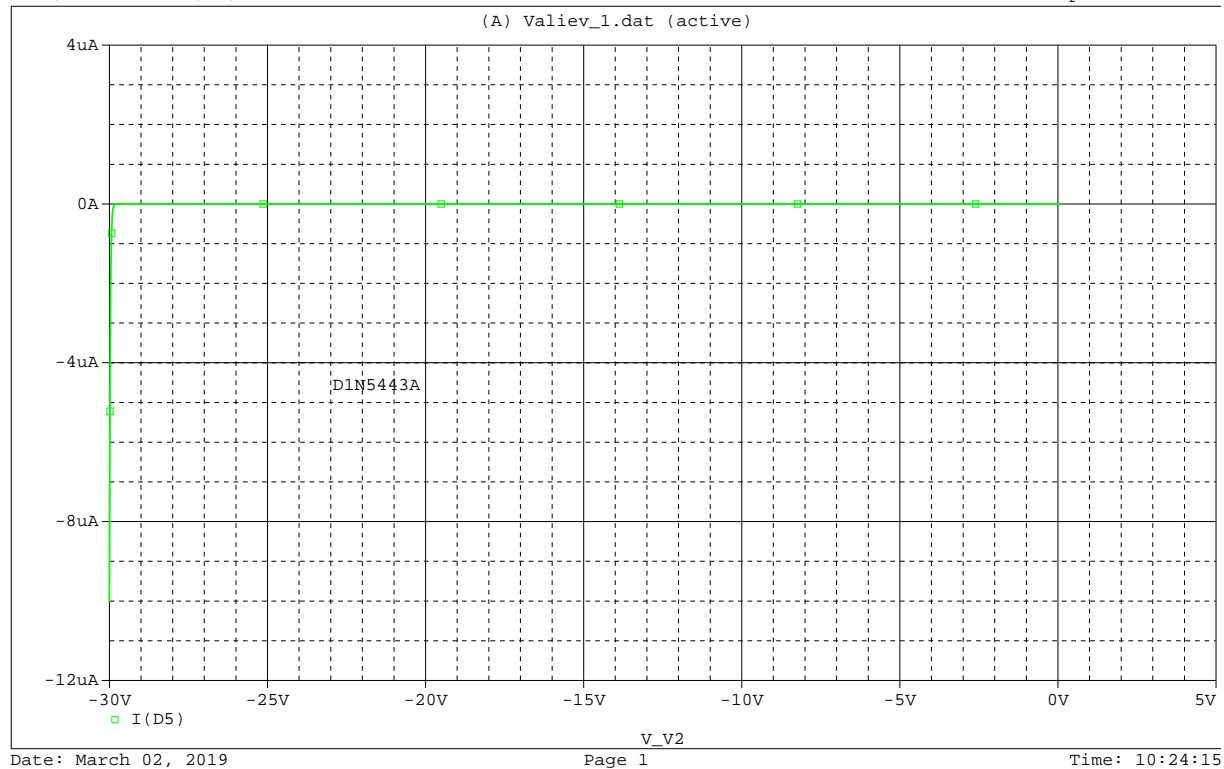


Рис. 27: D1N5443A



## 2.2. Температурные характеристики

2.2.1. Установим напряжение  $V = 0.6V$ . Получим зависимости прямого тока от температуры в диапазоне от  $-50^{\circ}C$  до  $+100^{\circ}C$ .

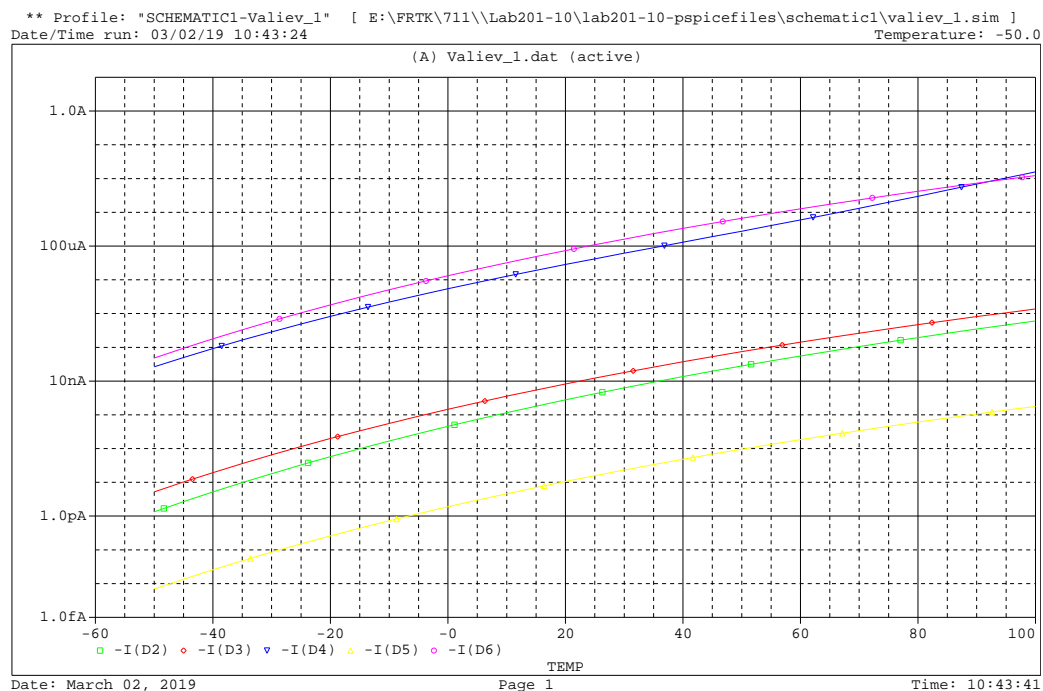


Рис. 28: Зависимости прямого тока от температуры в диапазоне от  $-50^{\circ}C$  до  $+100^{\circ}C$

2.2.1.a. Для импульсного ВЧ диода получим температурную зависимость относ. ТКПТ в области  $17^{\circ}C < T < 47^{\circ}C$  при  $U_d = 0.6V$ .

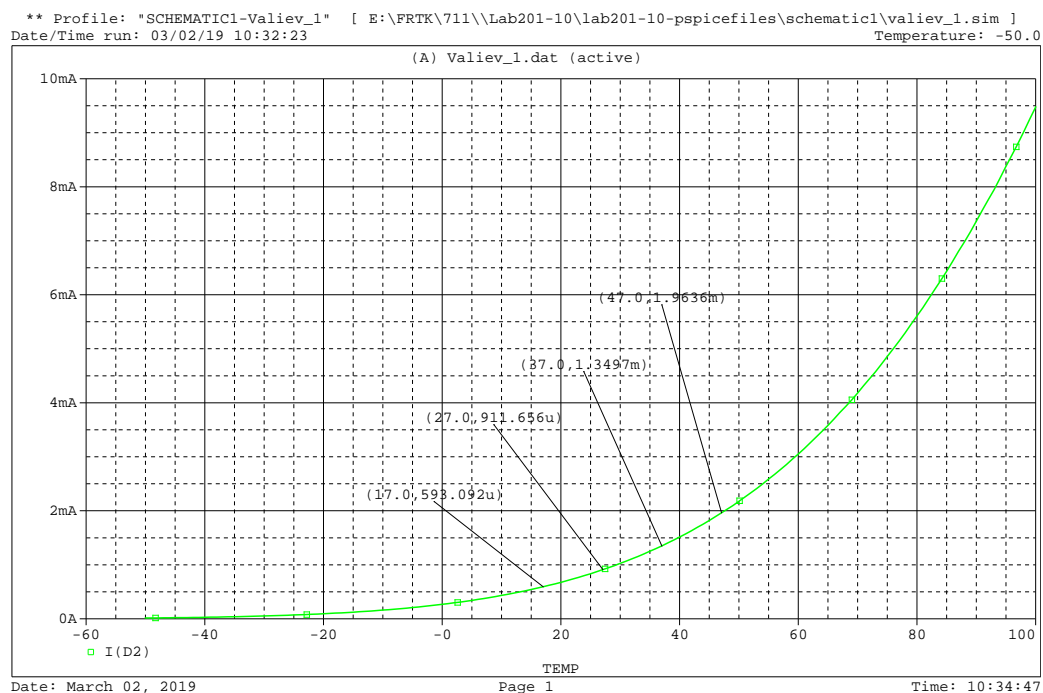


Рис. 29: D1N4149: при некоторых температурах

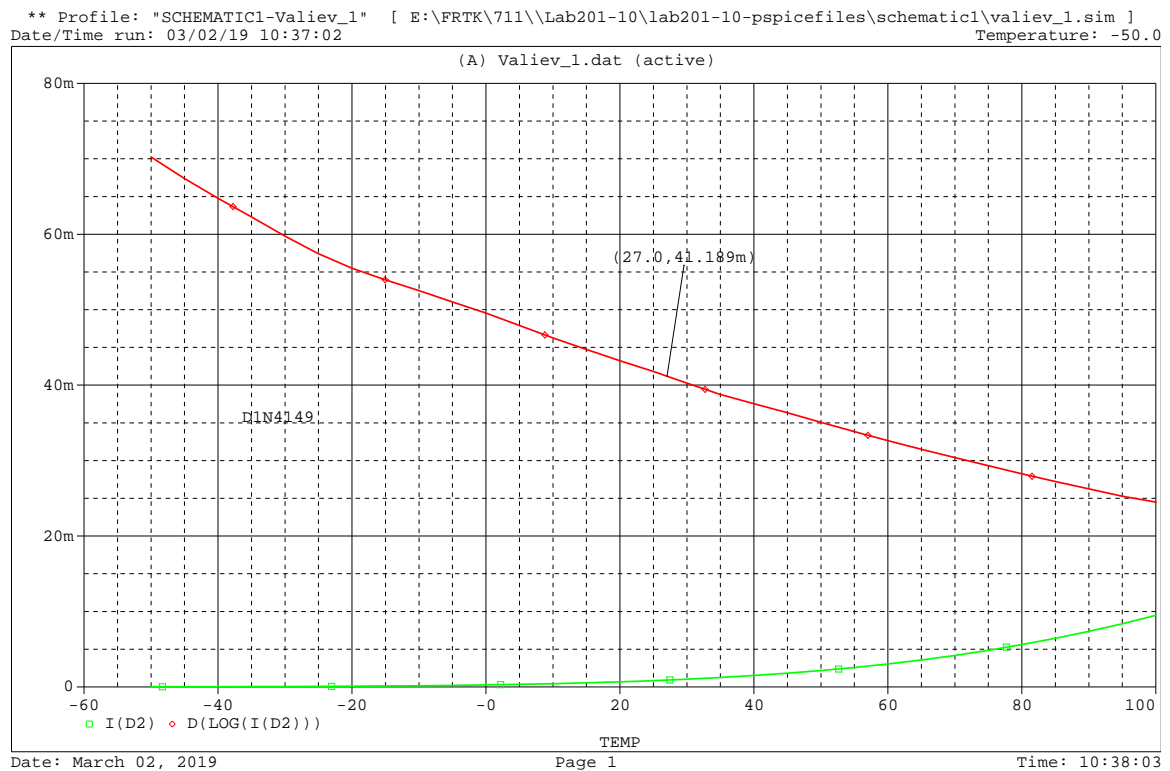


Рис. 30: D1N4149: относ.ТКПТ  $\approx 4.3\%$

Температурная зависимость обратного тока  $I_{\text{обр}} = f(T, U_d = \text{const})$

2.2.2. Перевернем диоды обратной стороной, установим напряжение 1V. Получим графики в логарифмическом масштабе зависимости обратных токов всех диодов.

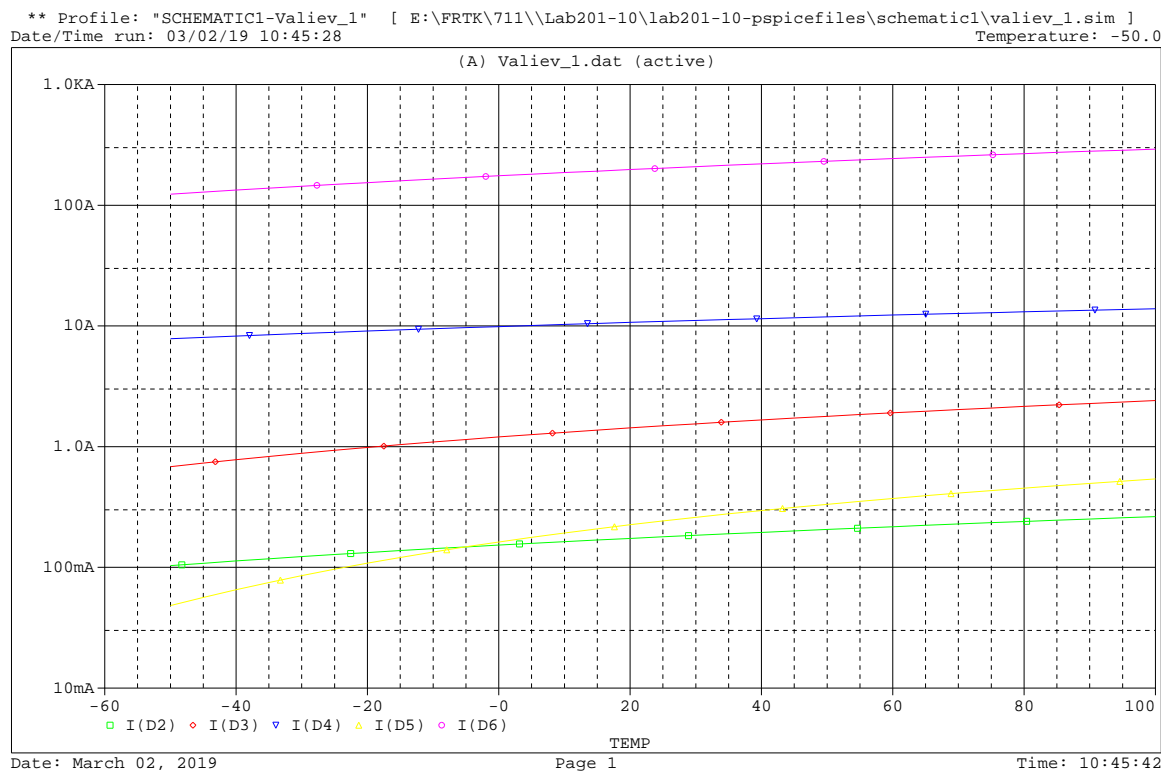


Рис. 31: Зависимости обратных токов всех диодов

**2.2.2.а.** Для импульсного ВЧ диода найдем значение обратного тока при  $T = 27^\circ\text{C}$ .

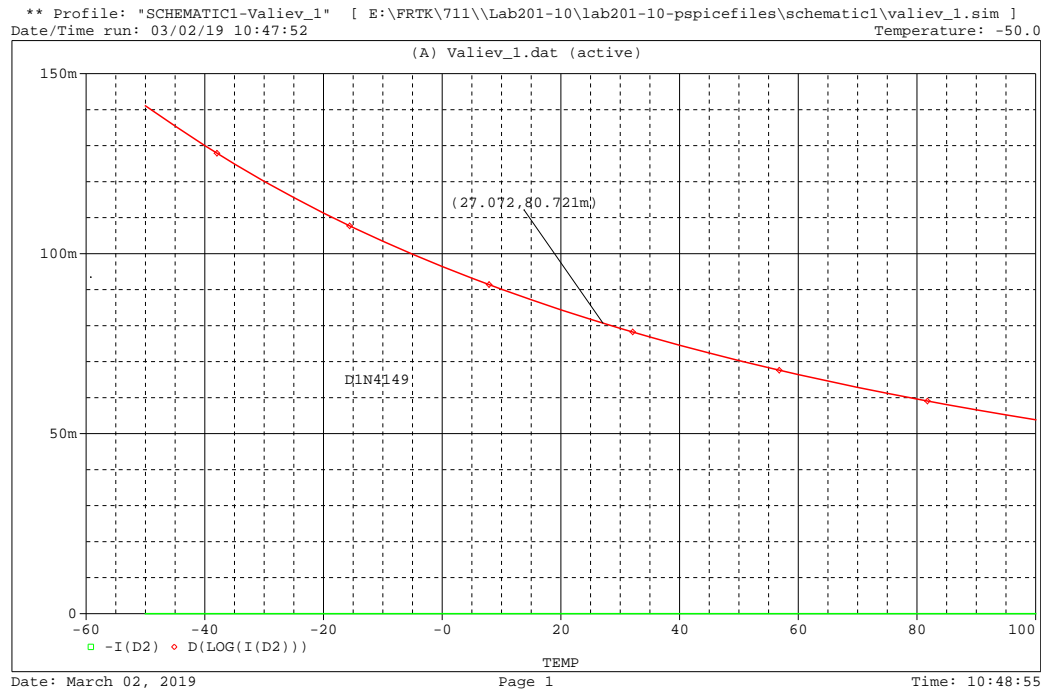


Рис. 32: Зависимости обратных токов всех диодов

**Температурная зависимость прямого напряжения**  $U_d = f(T, I_d = const)$

**2.2.3.** Соединим все диоды последовательно с источником тока  $1\text{mA}$  как на рисунке 2 получим графики зависимостей прямого напряжения на каждом диоде от температуры в диапазоне от  $-50^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$ .

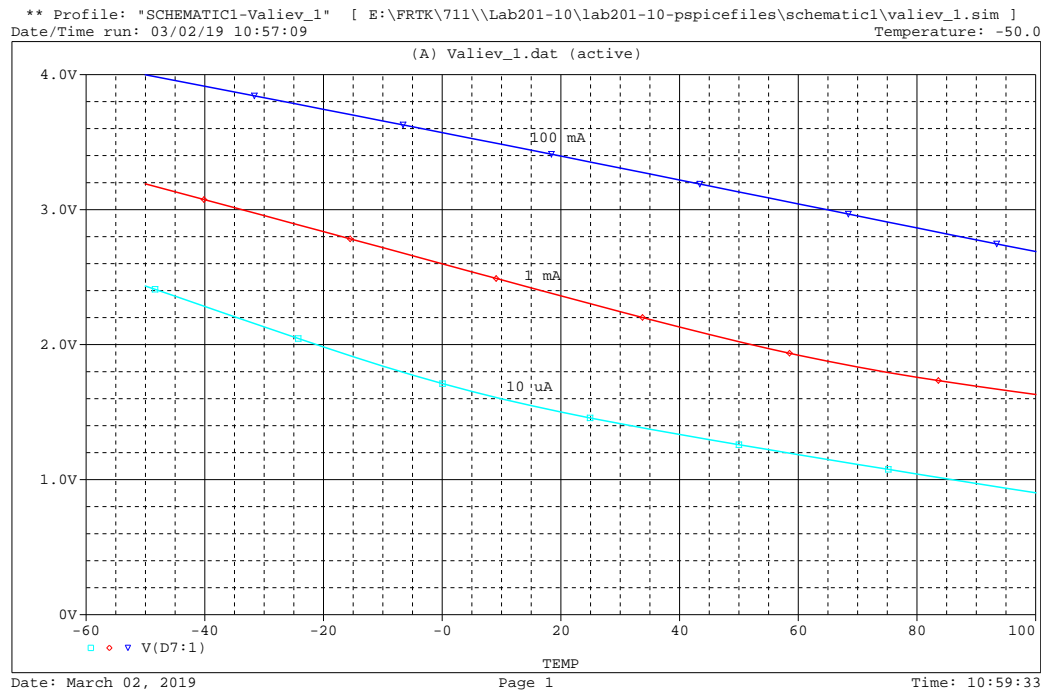


Рис. 33: D1N4149

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 03/02/19 11:00:47 Temperature: -50.0

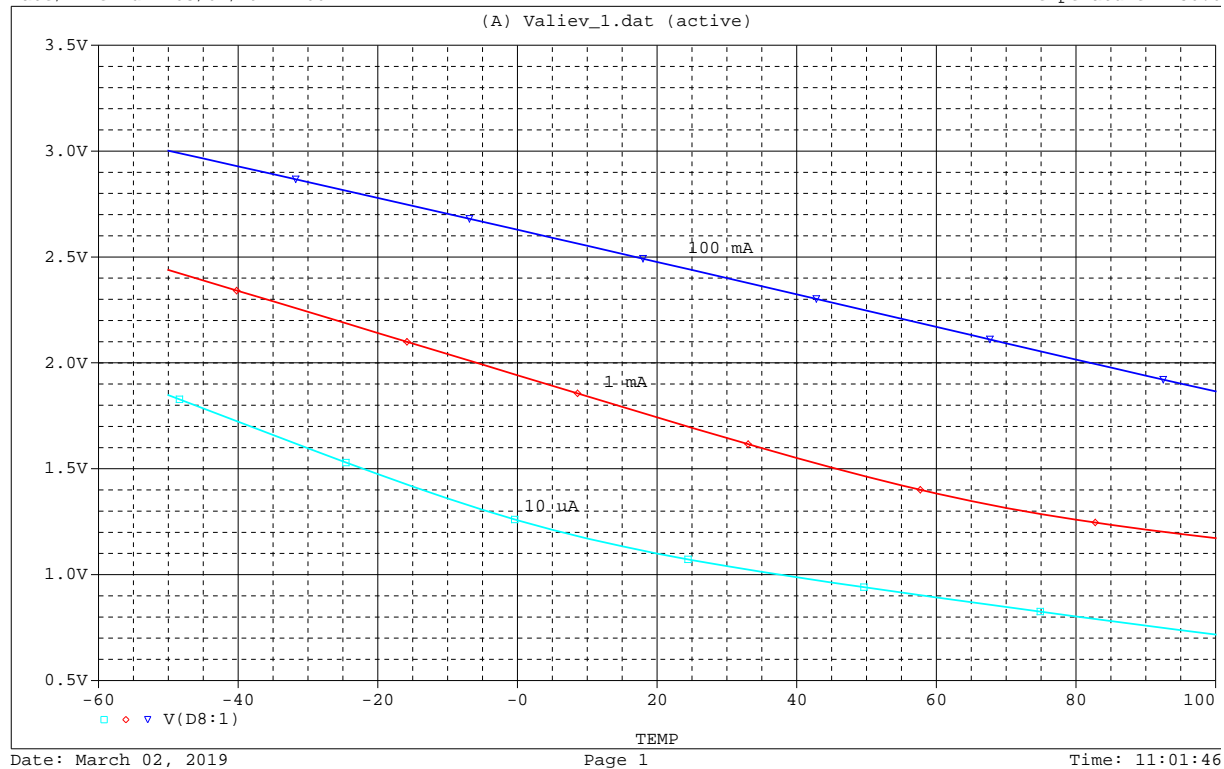


Рис. 34: D1N4002

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 03/02/19 11:01:59 Temperature: -50.0

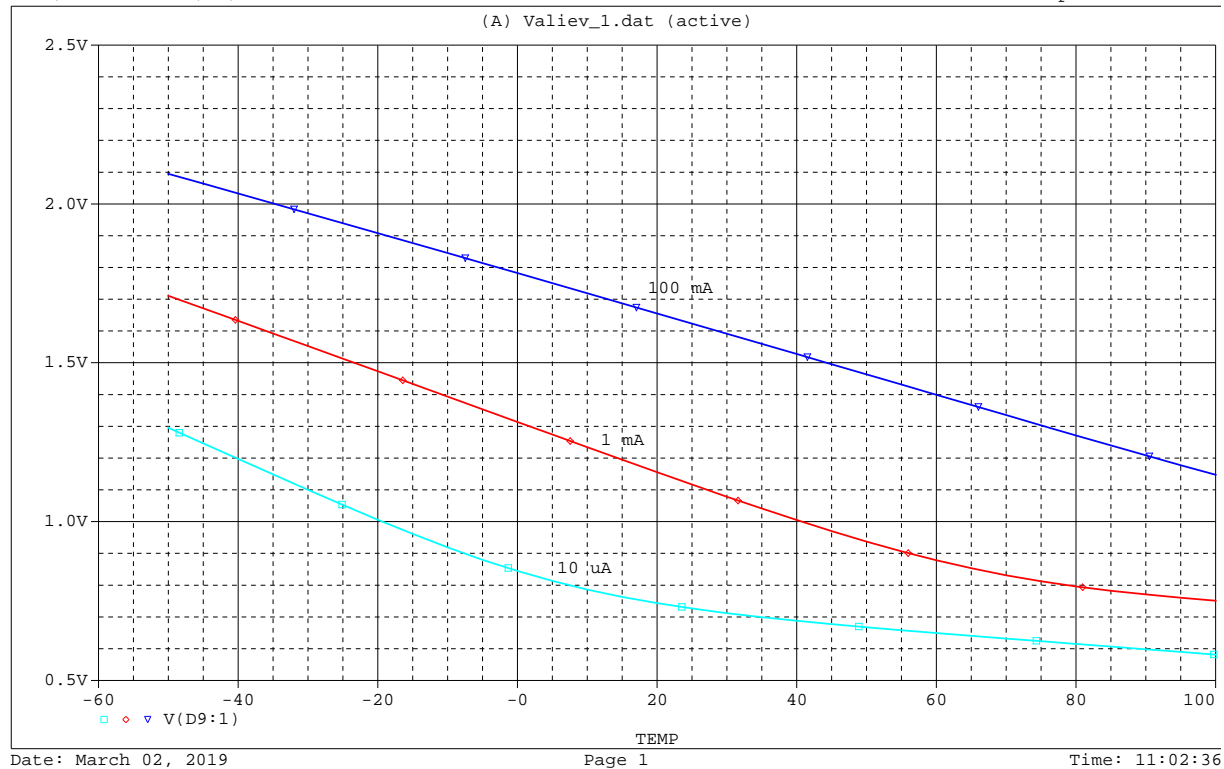


Рис. 35: D1N5818

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 03/02/19 11:02:52 Temperature: -50.0

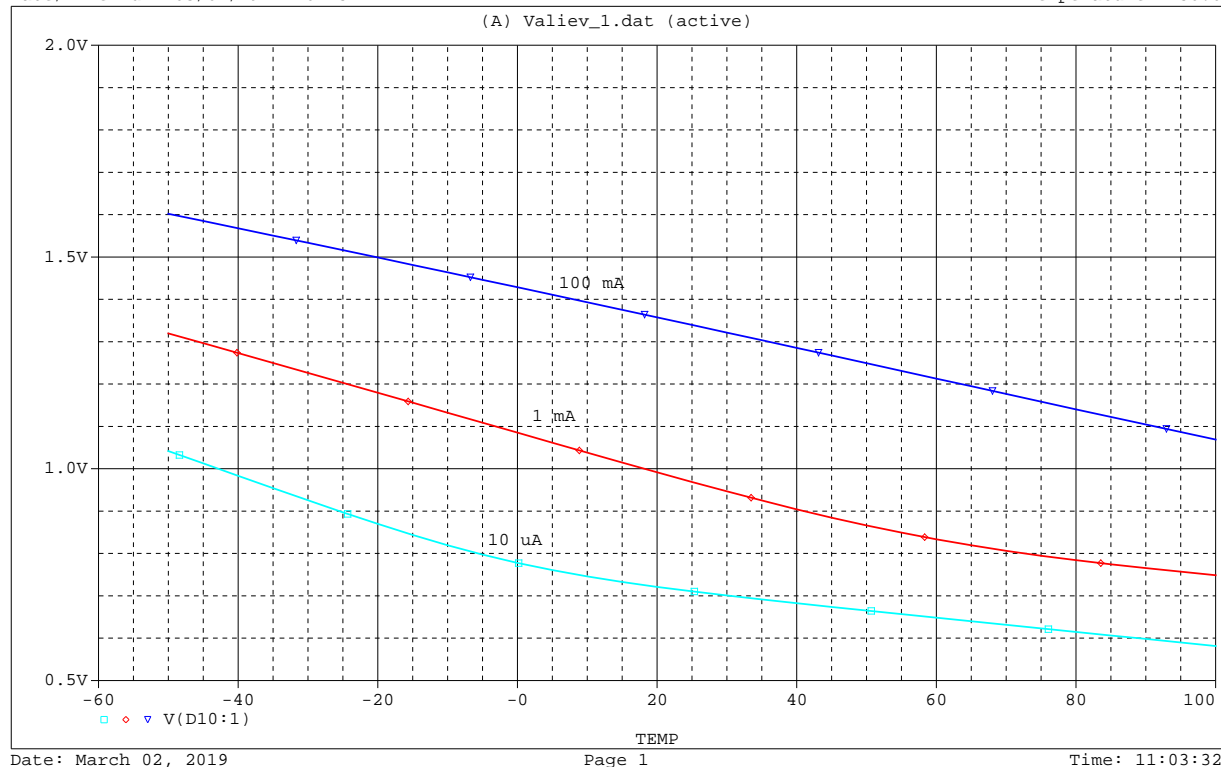


Рис. 36: D1N5443A

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
 Date/Time run: 03/02/19 11:03:42 Temperature: -50.0

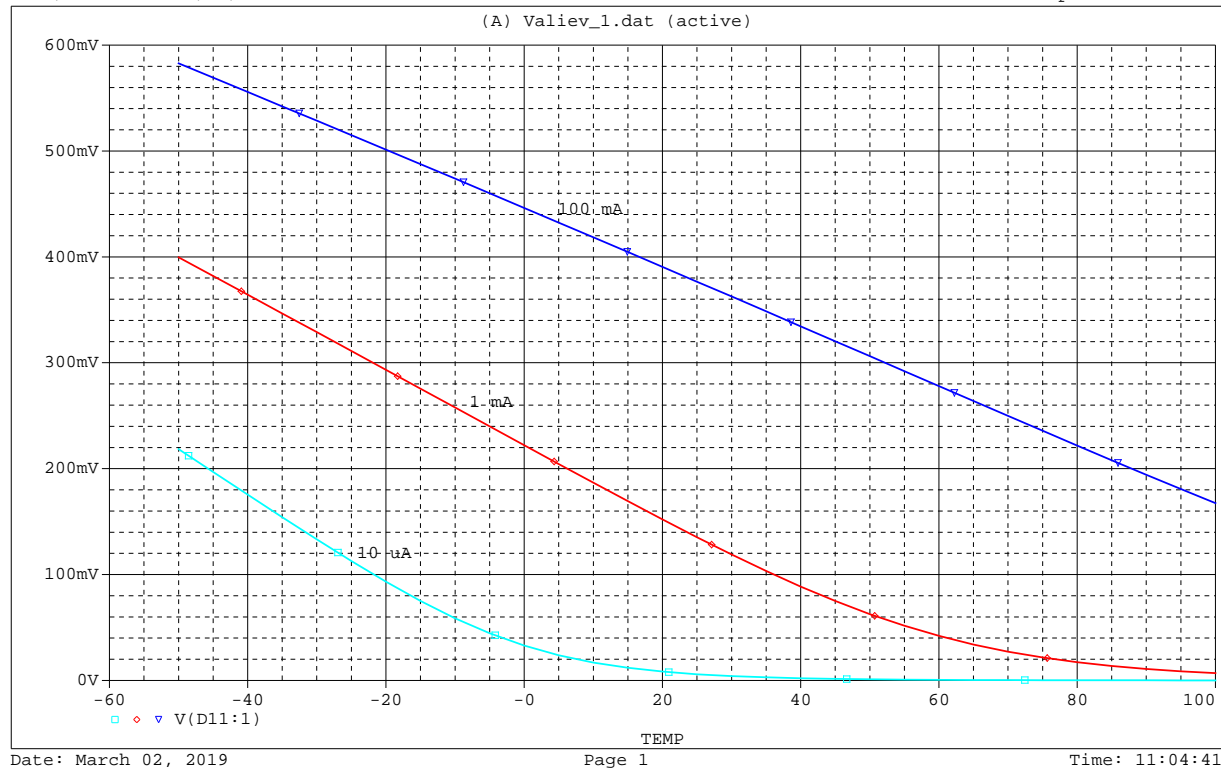


Рис. 37: D04AZ2\_2

## Температурная зависимость напряжения пробоя стабилитрона

**2.2.4.** Повернем стабилитрон как-то к источнику тока и получим зависимость напряжения на стабилитроне от обратного тока  $U = f(I_{\text{обр}}, T = \text{const})$  в диапазоне от  $(2 - 5) \text{ mA}$  до  $(50 - 100) \text{ mA}$  при значениях температуры:  $-40^\circ\text{C}$ ,  $27^\circ\text{C}$ ,  $85^\circ\text{C}$ .

**2.2.4.a.** Изобразим полученную зависимость на графике (рисунок 38).

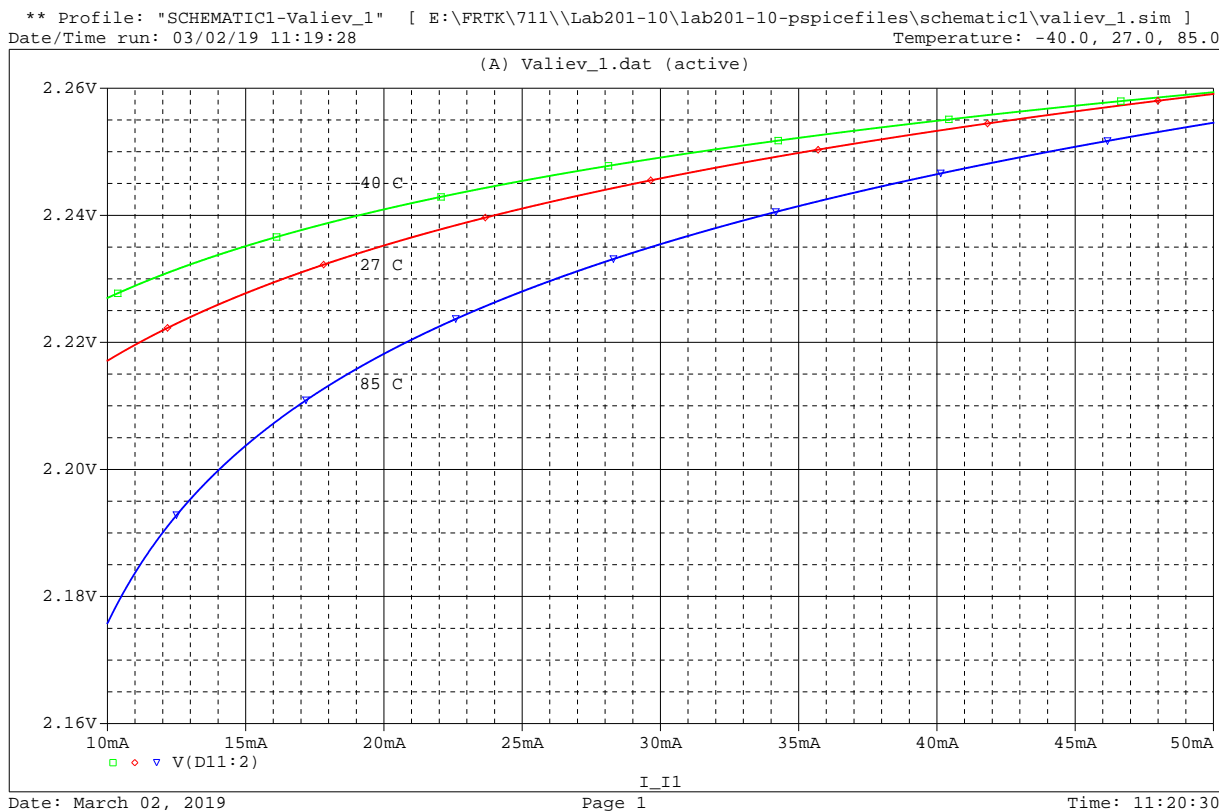


Рис. 38: Стабилитрон

**2.2.4.6.** Для ВАХ с параметром  $T = 27^\circ\text{C}$  напечатаем на графике необходимые данные и определим величину абсолютного и относительного изменений (относительно паспортного значения  $U_{st} = Bv$ ) напряжения в использованном диапазоне  $\Delta I = (50 - 100)\text{mA} - (2 - 5)\text{mA}$  изменений тока.

$$\frac{\Delta U}{U_{st}} \cdot 100\% \approx 2.7\%$$

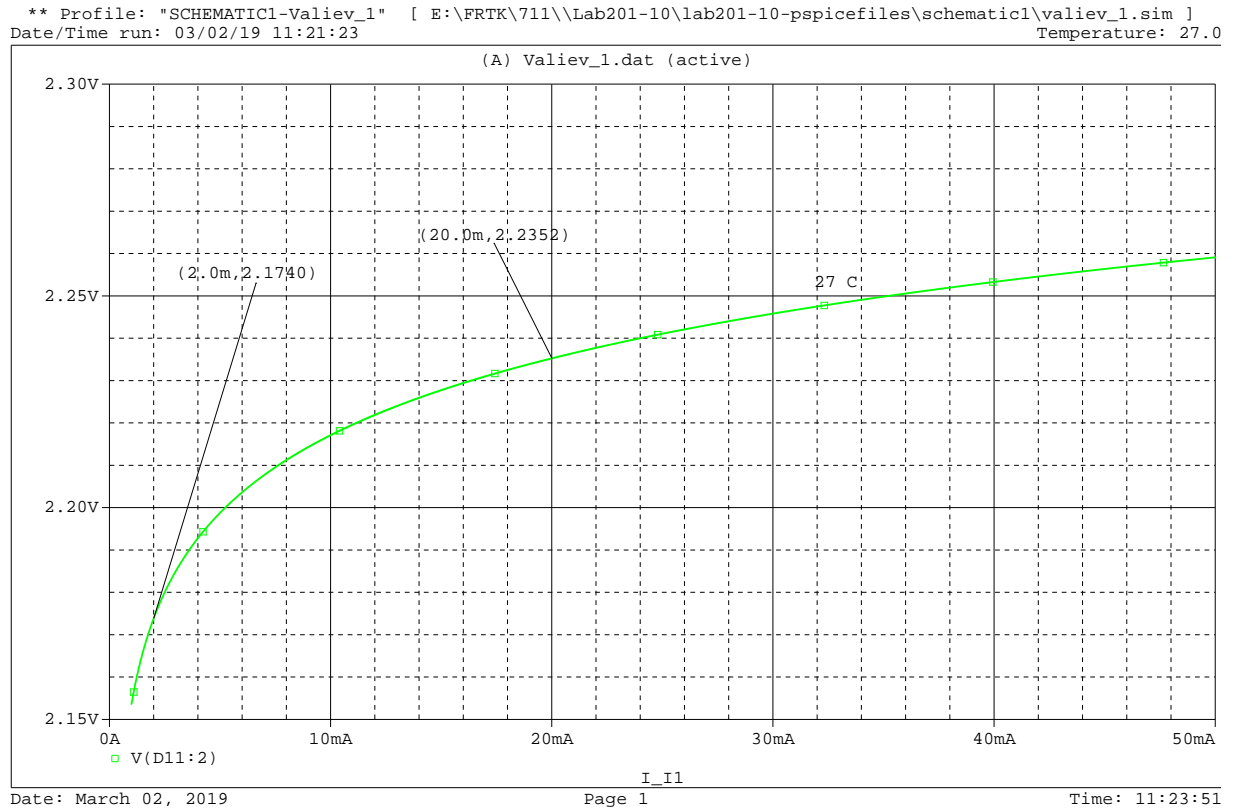


Рис. 39: Стабилитрон при  $T = 27^\circ\text{C}$

**2.2.4.в.** Получим зависимость дифференциального сопротивления стабилитрона от тока, а также найдем его значение при  $10mA$ .

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Valiev\_1" [ E:\FRTK\711\Lab201-10\lab201-10-pspicefiles\schematic1\valiev\_1.sim ]  
Date/Time run: 03/02/19 11:25:40 Temperature: 27.0

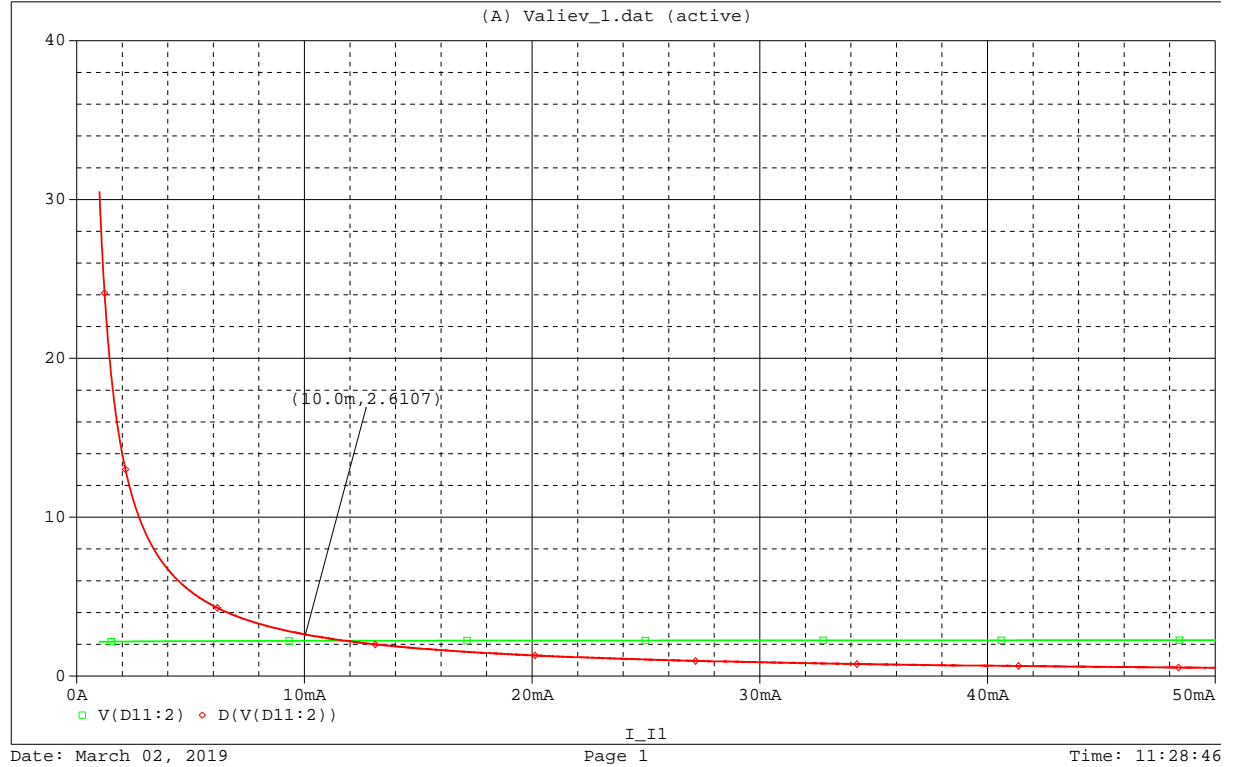


Рис. 40: Стабилитрон и его дифференциальное сопротивление

При  $I = 10mA$  получаем значение дифференциального сопротивления

$$R(I = 10mA) \approx 2.61\Omega$$