

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ПРИКЛАДНОЙ  
ИНФОРМАТИКИ

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 201D-1

---

**Динамические 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:

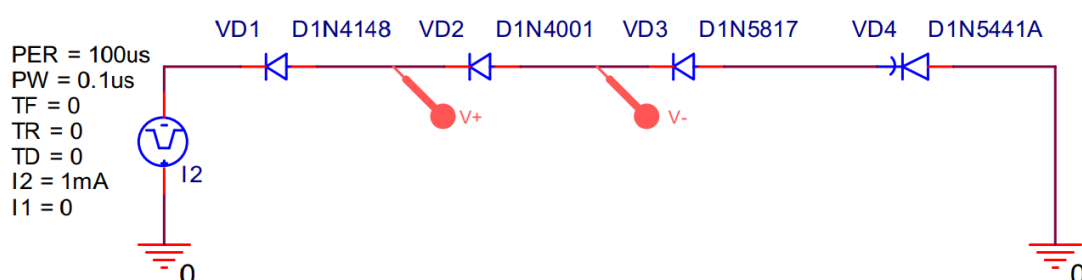


Рис. 1: Схема моделирования заряда барьерной емкости

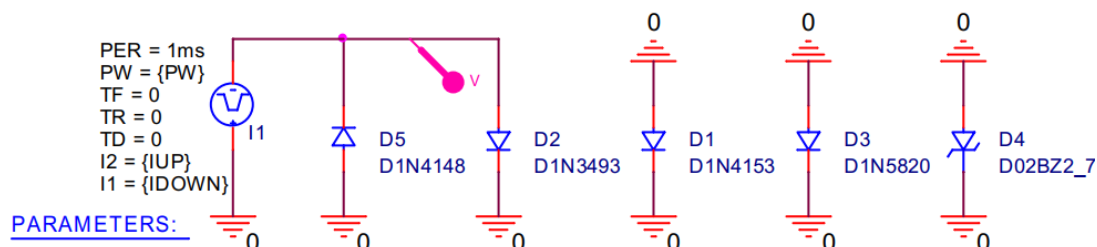


Рис. 2: Схема моделирования процесса рассасывания неосновных носителей

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

## 2.1. Барьерная ёмкость

### Заряд барьерной ёмкости

**2.1.1.** Соединим диоды (кроме стабилитрона) по схеме, изображенной на рис. 1.

Установим параметры импульса: исходное состояние  $I_1 = 0$ , амплитуда импульса  $I_2 = 1\mu\text{A} - 10\text{mA}$  (зависит от диода), задержка  $T_D = 0$ , длительность фронта  $T_R = 0$ , длительность спада  $T_F = 0$ , длительность вершины импульса  $PW = 10\mu\text{s}$ , период повторения  $PER = 100\mu\text{s}$ .

Для каждого диода подберем  $I_2$  и Run to Time так, чтобы обратное напряжение к концу интервала наблюдения достигало  $10\text{V} - 50\text{V}$ , но не превышало напряжения пробоя ( $V_B$  в модели). Амплитуда тока  $I_2$  должна быть много больше максимального обратного тока диода.

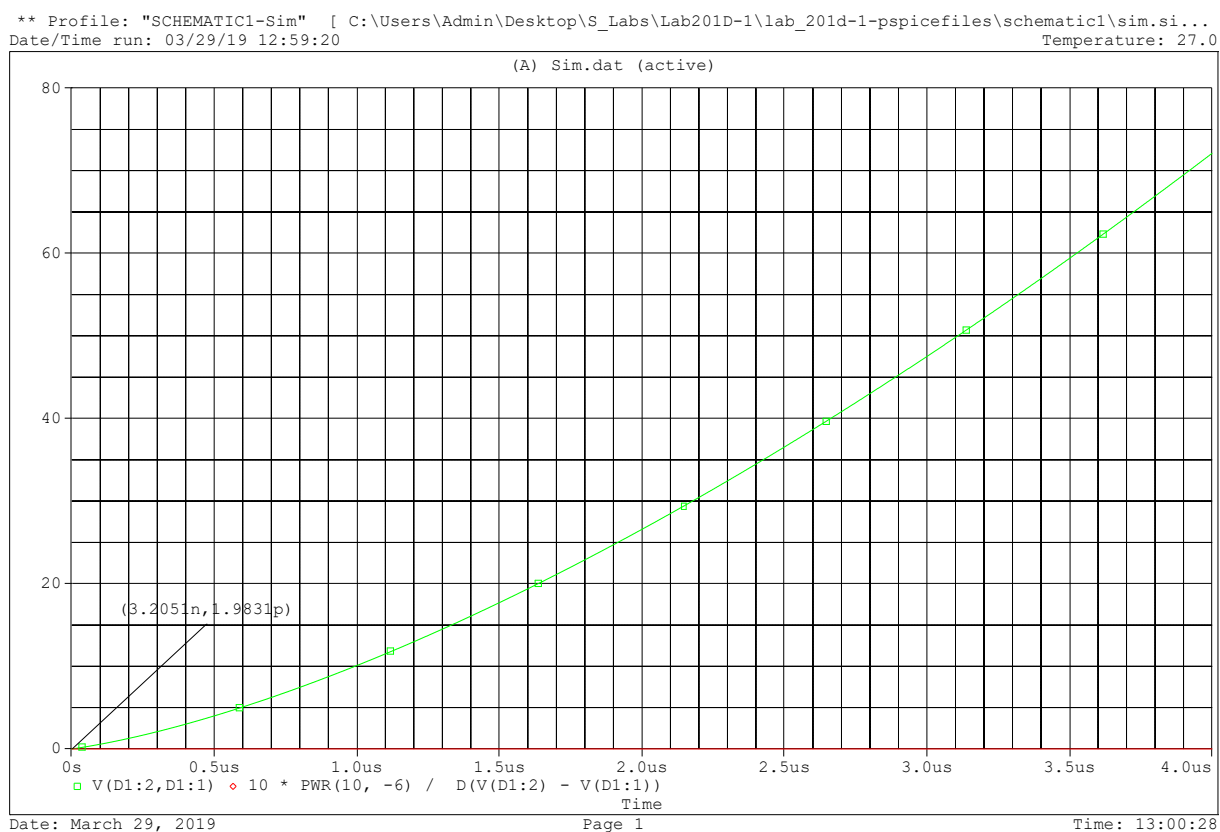


Рис. 3: D1N4149

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 13:02:14 Temperature: 27.0

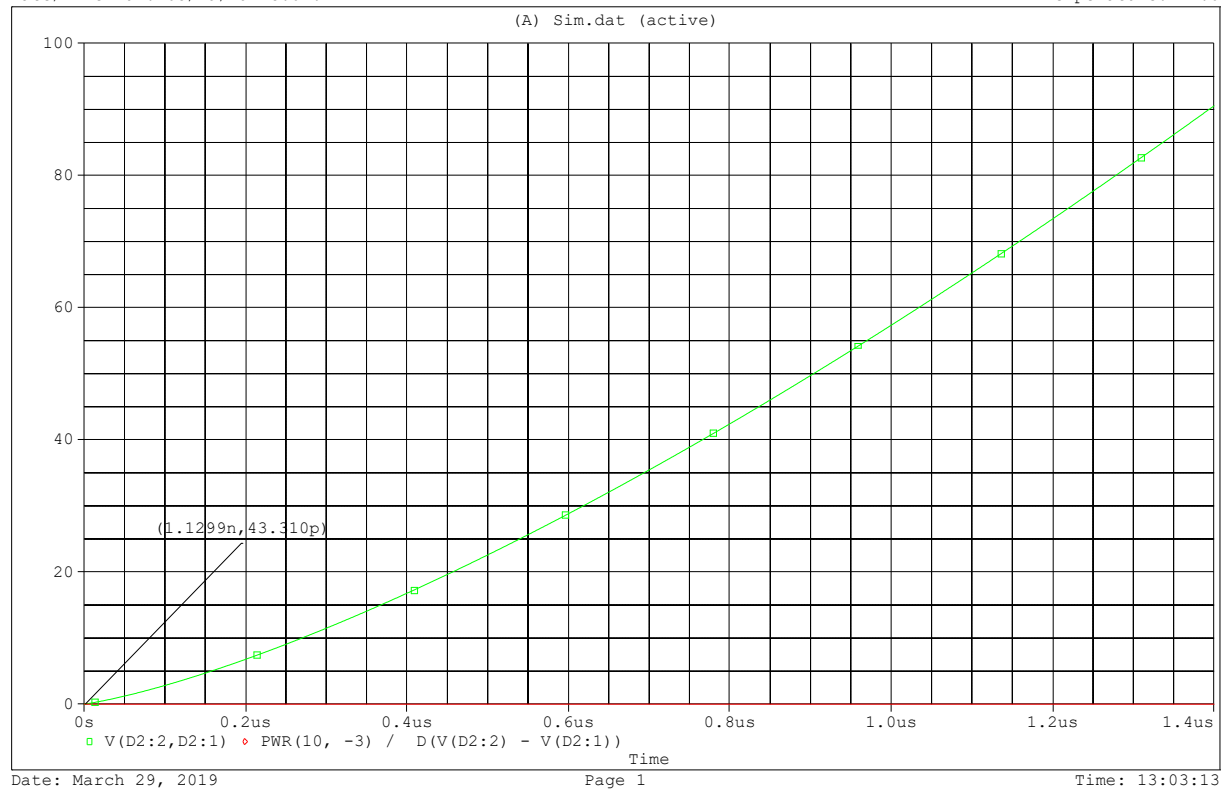


Рис. 4: D1N4002

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 13:06:52 Temperature: 27.0

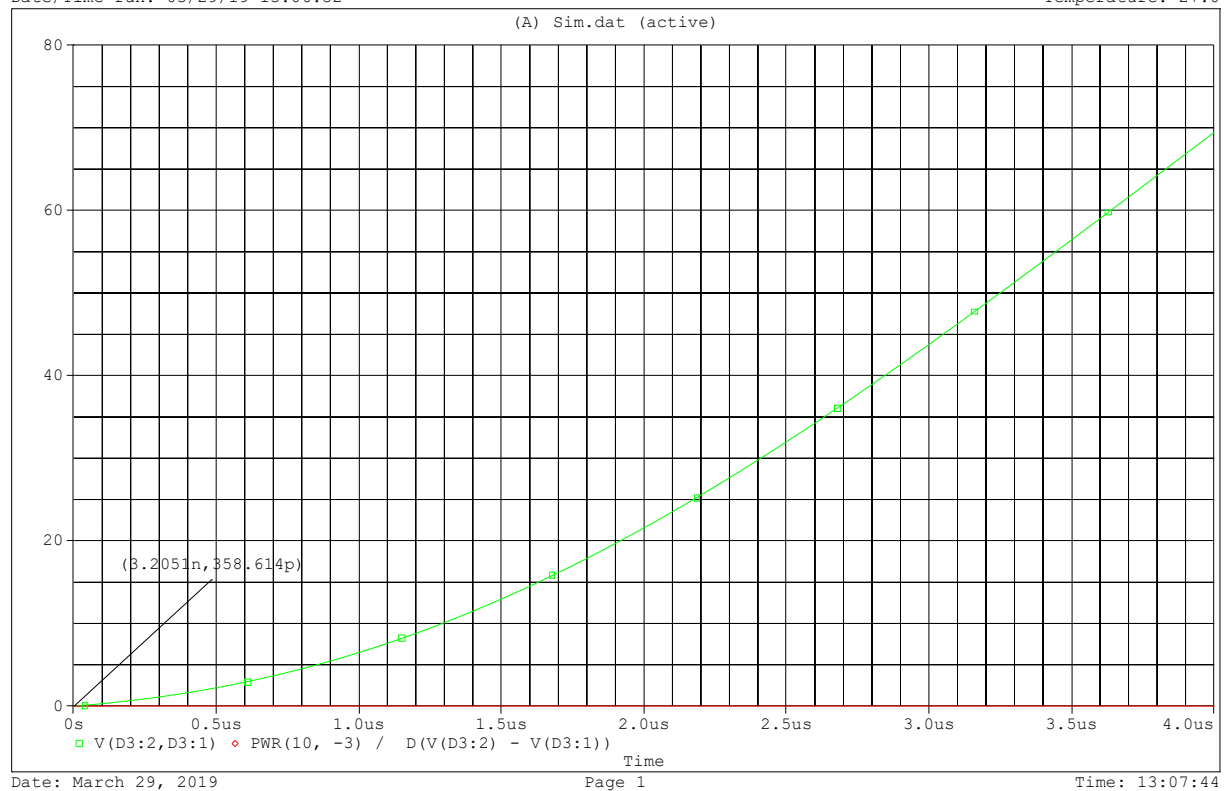


Рис. 5: D1N5818

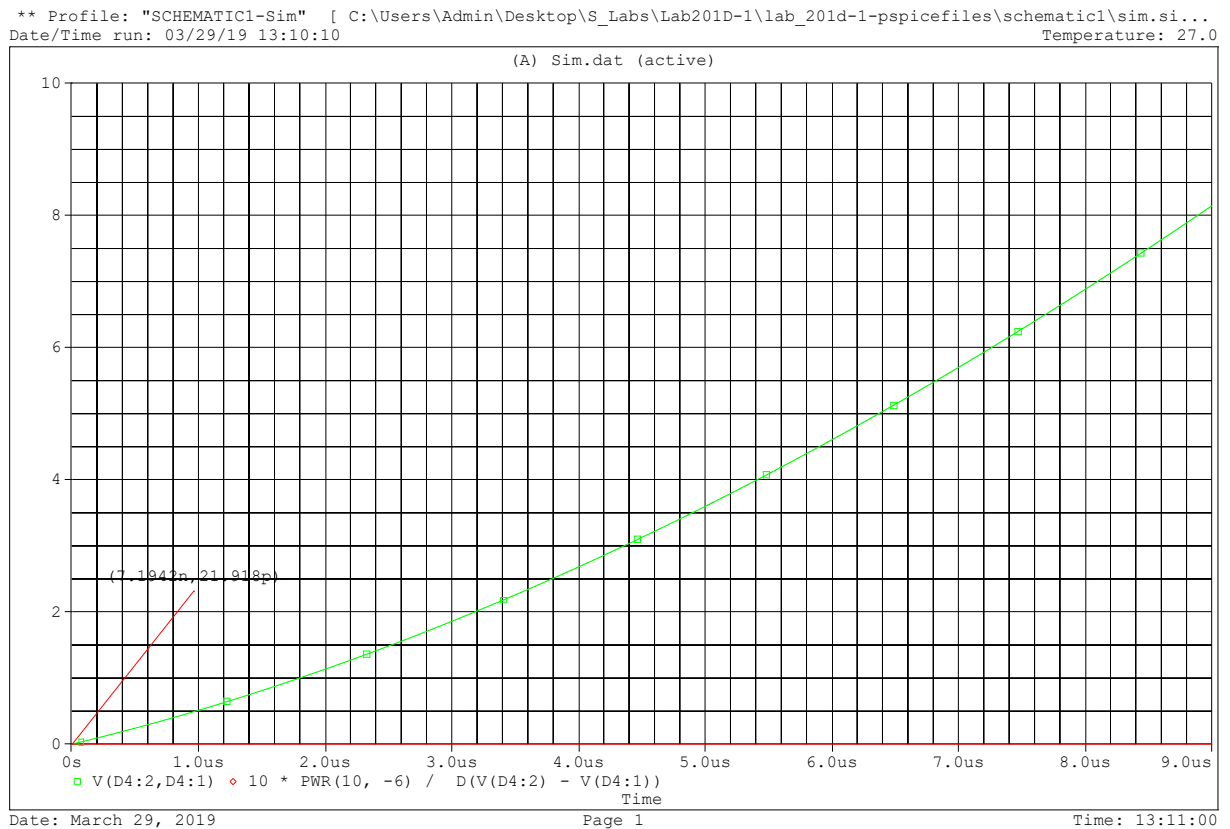


Рис. 6: D1N5443A

**2.1.1.a.** Из временных диаграмм каждого диода определим производную и рассчитаем величину барьерной ёмкости  $C_{j0}$  при нулевом напряжении на диоде:

$$C_{j0} \approx \left( I_2 / \frac{\Delta U}{\Delta t} \right)$$

Сравним результаты со значениями  $C_{j0}$  модели.

Значения барьерных ёмкостей были получены с помощью расчетного блока **OrCAD** и приведено на графиках, изображённых выше.

	D1N4149	D1N4002	D1N5818	D1N5443A
Эксп. $C_{j0}$	2p	43p	359p	22p
Теор. $C_{j0}$	2p	51p	359p	22p

Таблица 2: Сравнение значений барьерных емкостей

### Зависимость барьерной ёмкости от напряжения и температуры

**2.1.2.** Для каждого диода составим схему моделирования зависимости барьерной емкости от “обратного” напряжения (рис. 7). Получим зависимости токов от времени. По известной крутизне и емкости конденсатора определим масштаб напряжения (горизонтальной оси) и масштаб емкости (вертикальной оси).

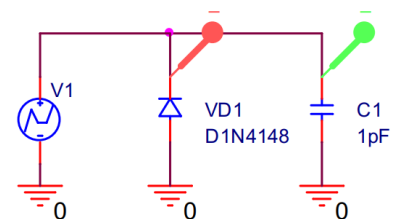


Рис. 7: Схема соединения

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 14:23:01 Temperature: 27.0

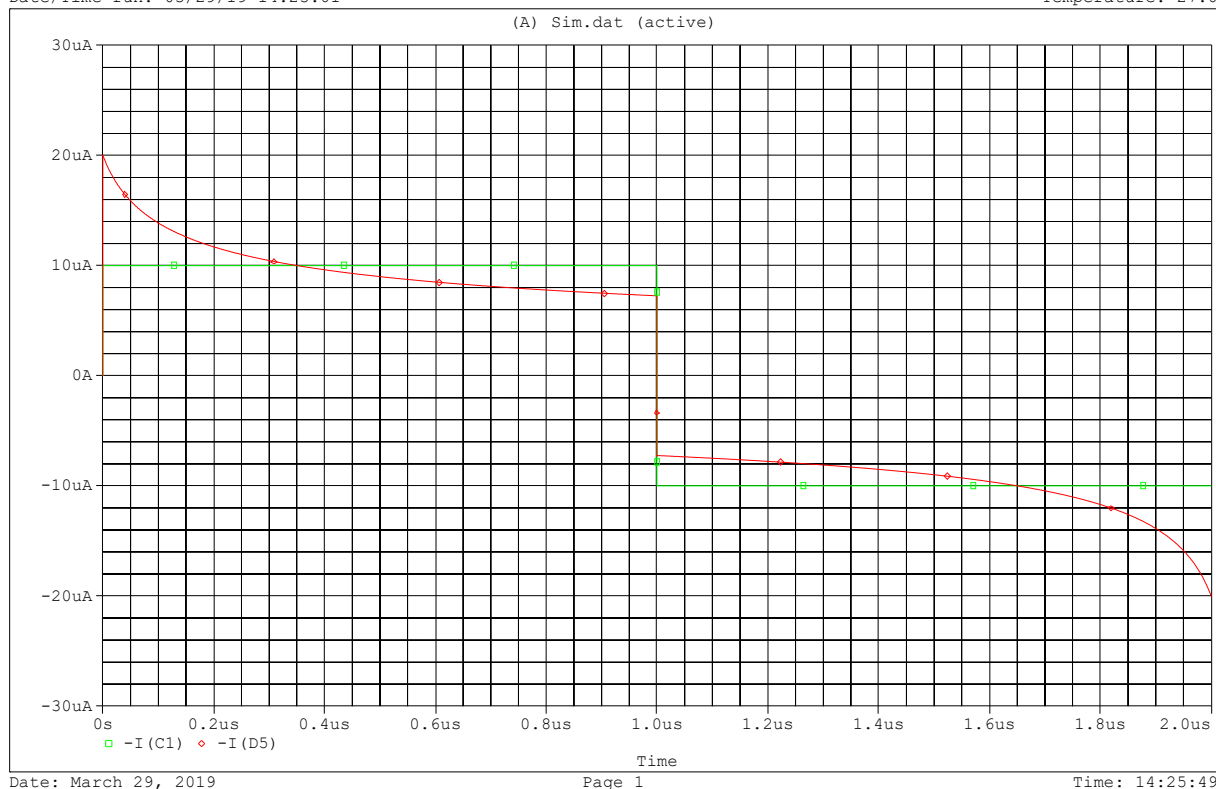


Рис. 8: D1N4149

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 14:28:11 Temperature: 27.0

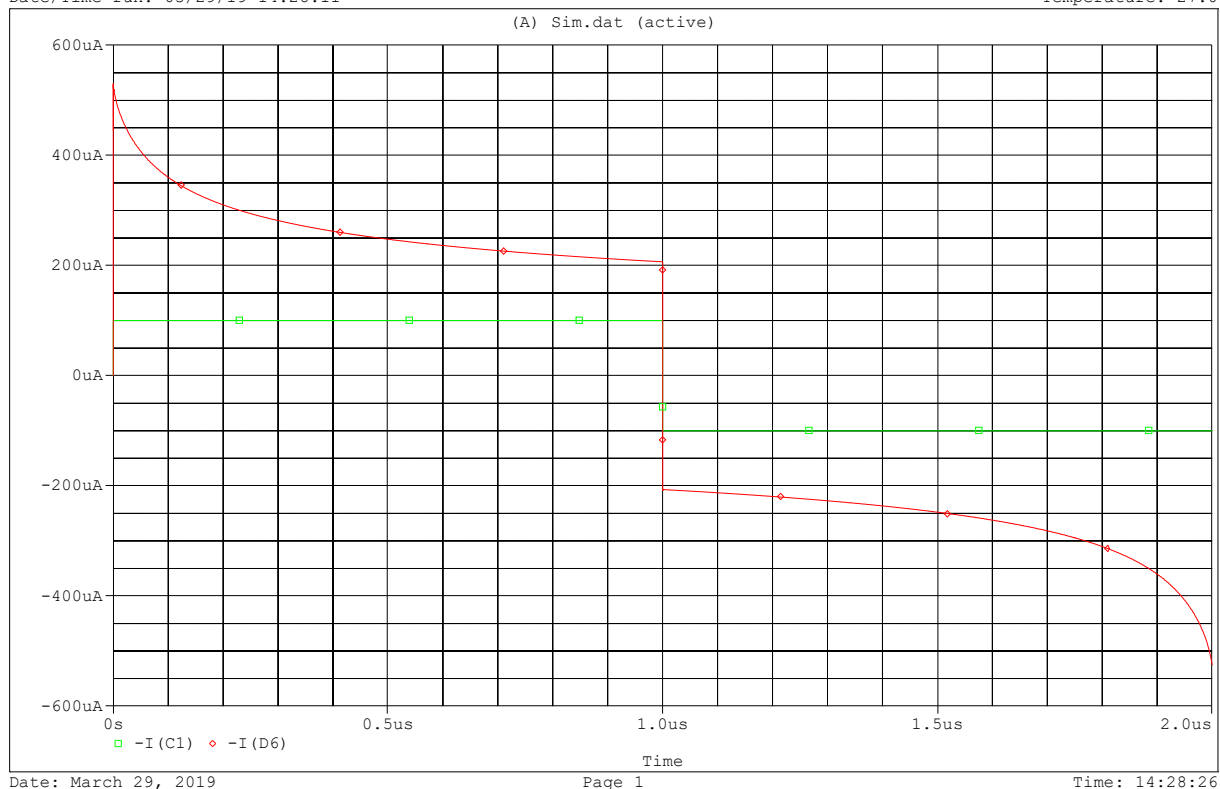
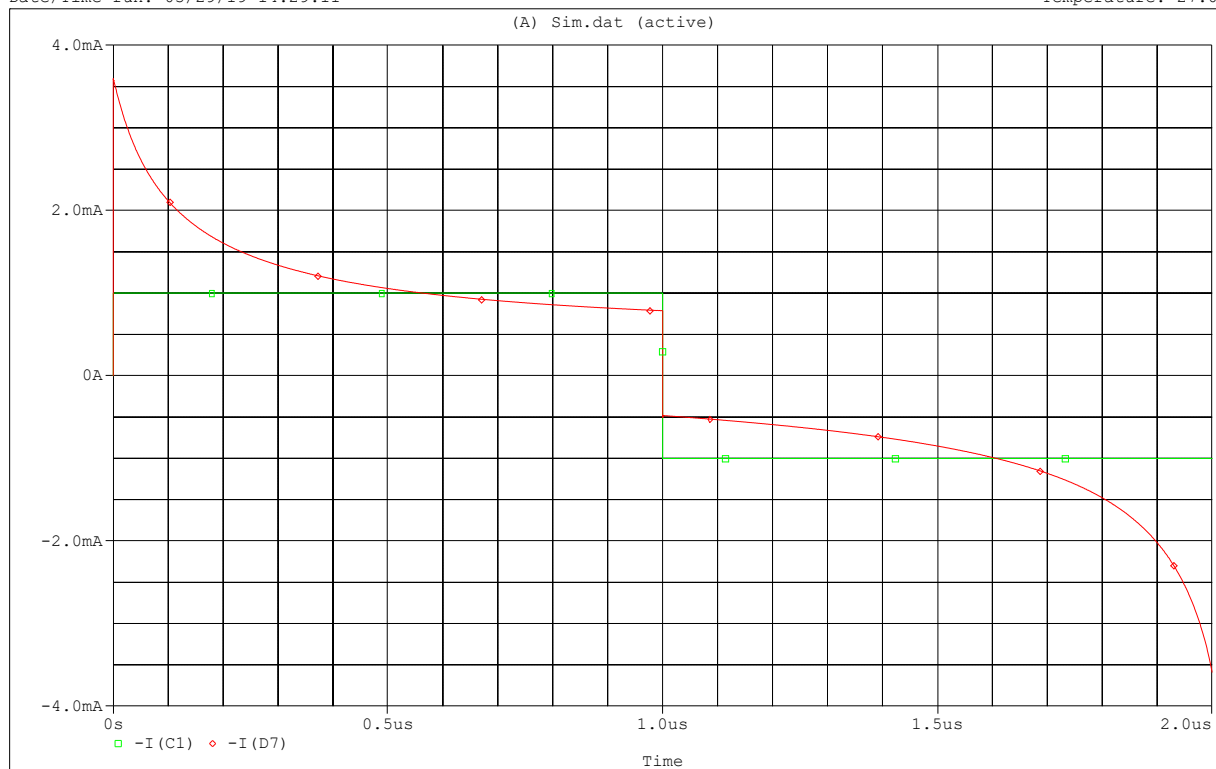


Рис. 9: D1N4002

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 14:29:11 Temperature: 27.0



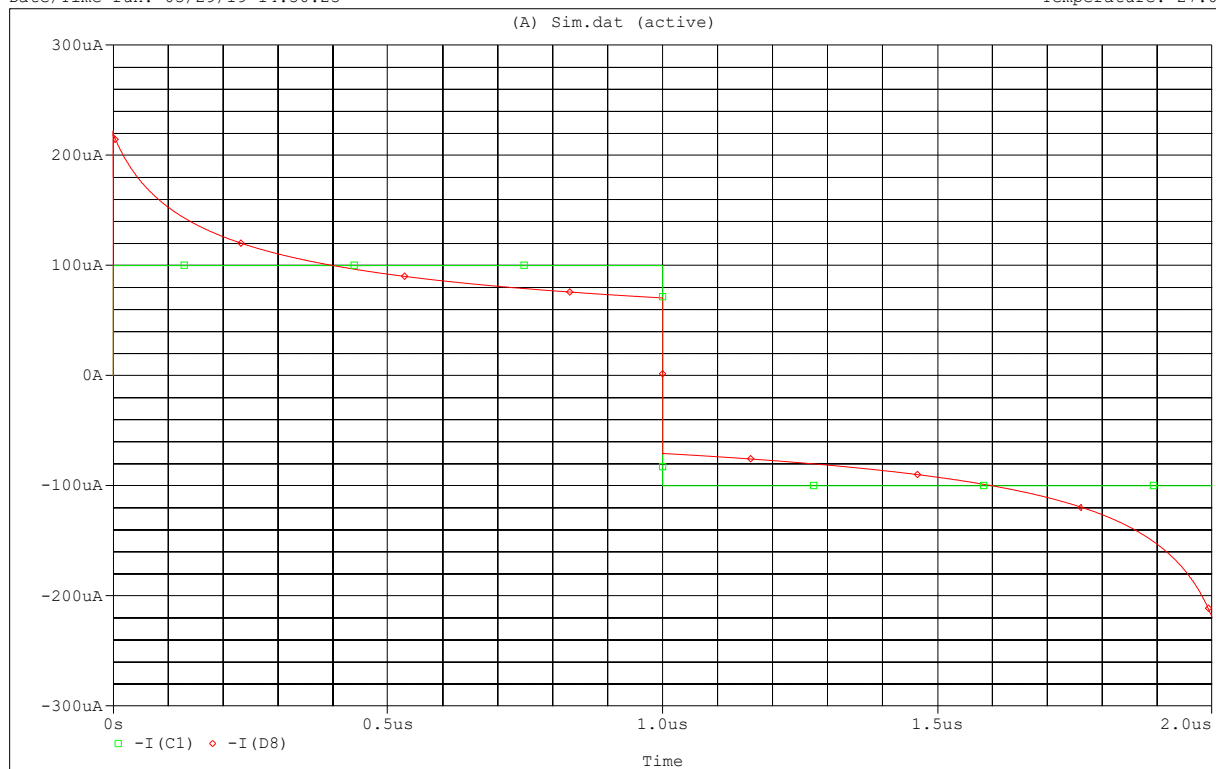
Date: March 29, 2019

Page 1

Time: 14:29:31

Рис. 10: D1N5818

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 14:30:23 Temperature: 27.0



Date: March 29, 2019

Page 1

Time: 14:30:37

Рис. 11: D1N5443A

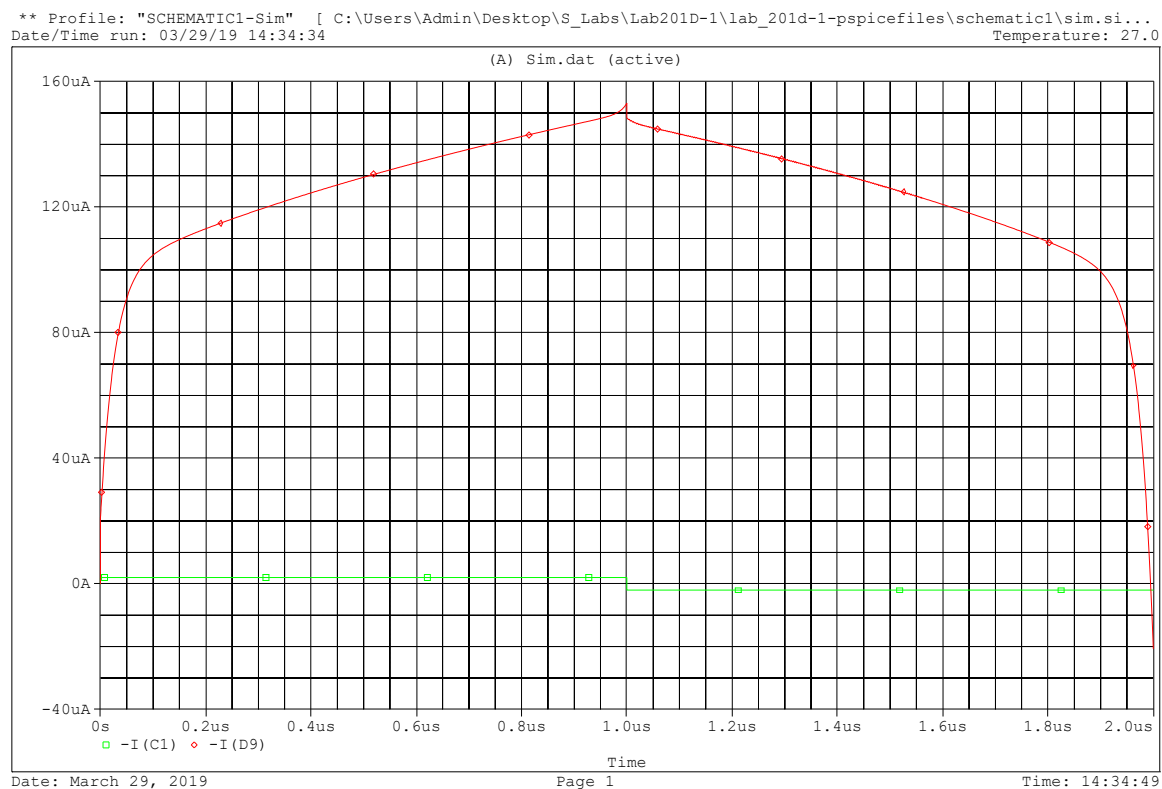


Рис. 12: D04AZ2\_2

**2.1.2.а.** Для импульсного ВЧ диода дополнительно для  $-60, 27, 120$  градусов Цельсия получим семейство температурных зависимостей барьерной ёмкости.

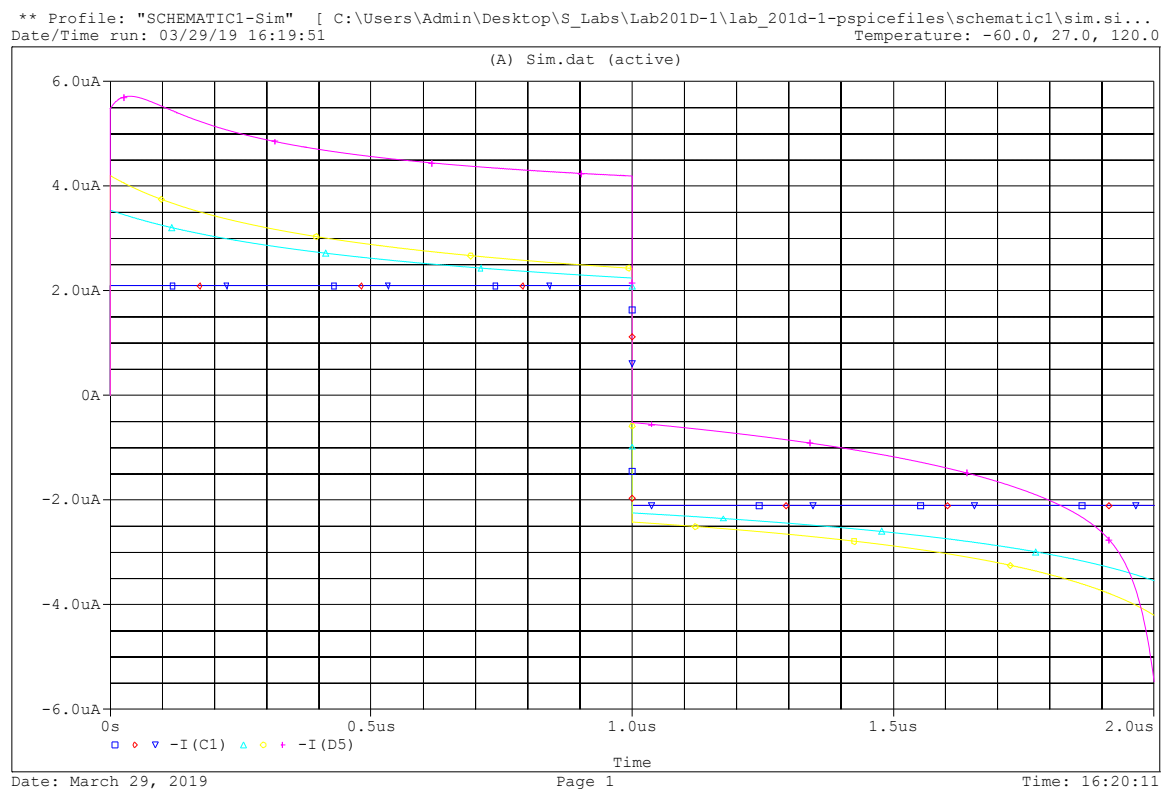


Рис. 13: D1N4149



$$T = -60^{\circ}\text{C} : \quad C_{\text{бар}} = 1.8\text{pF}$$

$$T = 27^{\circ}\text{C} : \quad C_{\text{бар}} = 2\text{pF}$$

$$T = 120^{\circ}\text{C} : \quad C_{\text{бар}} = 2.39\text{pF}$$

**2.1.2.б.** Проверим соответствуют ли полученные в пункте 2.1.2 зависимости барьерных емкостей диодов от напряжения теоретической зависимости. Определим  $U_0$ .

$$\text{D1N4149: } U_0 = 1.67\text{V}$$

$$\text{D1N4002: } U_0 = 2.11\text{V}$$

$$\text{D1N5818: } U_0 = 2.53\text{V}$$

$$\text{D1N5443A: } U_0 = 2.12\text{V}$$

Для стабилитрона приближение не выполняется.

**2.1.2.в.** Предложим метод получения зависимости барьерной емкости от обратного напряжения при сравнимых токах  $C \cdot dU/dt$  и  $I_{sr}$ .

При выбранных масштабах крутизны и емкости можно будет построить сдвоенную систему координат, затем из-за линейности импульсов источника можно будет определить величину барьерной ёмкости через ёмкость нормировочного конденсатора.

**2.1.2.г.** Как зависит оценка (по результатам моделирования)  $C_{j0}$  от обратного тока диода?

Линейным образом в области нормировки дополнительным конденсатором согласно устройству источника.

## 2.2 Диффузионная ёмкость

**2.2.1.** Импульсами тока этого генератора накапливаются неосновные носители (“заряжается диффузионная емкость”) исследуемого диода, а в паузе между импульсами рассасываются не основные носители (“диффузионная емкость разряжается”). Время разряда диффузионной емкости определяется по задержке начала разряда барьерной емкости после спада импульса  $I_1$ .

Проведем временное моделирование для напряжения на диоде. Для каждого диода подберем параметры PW импульсов, Run Time и Maximum step size.

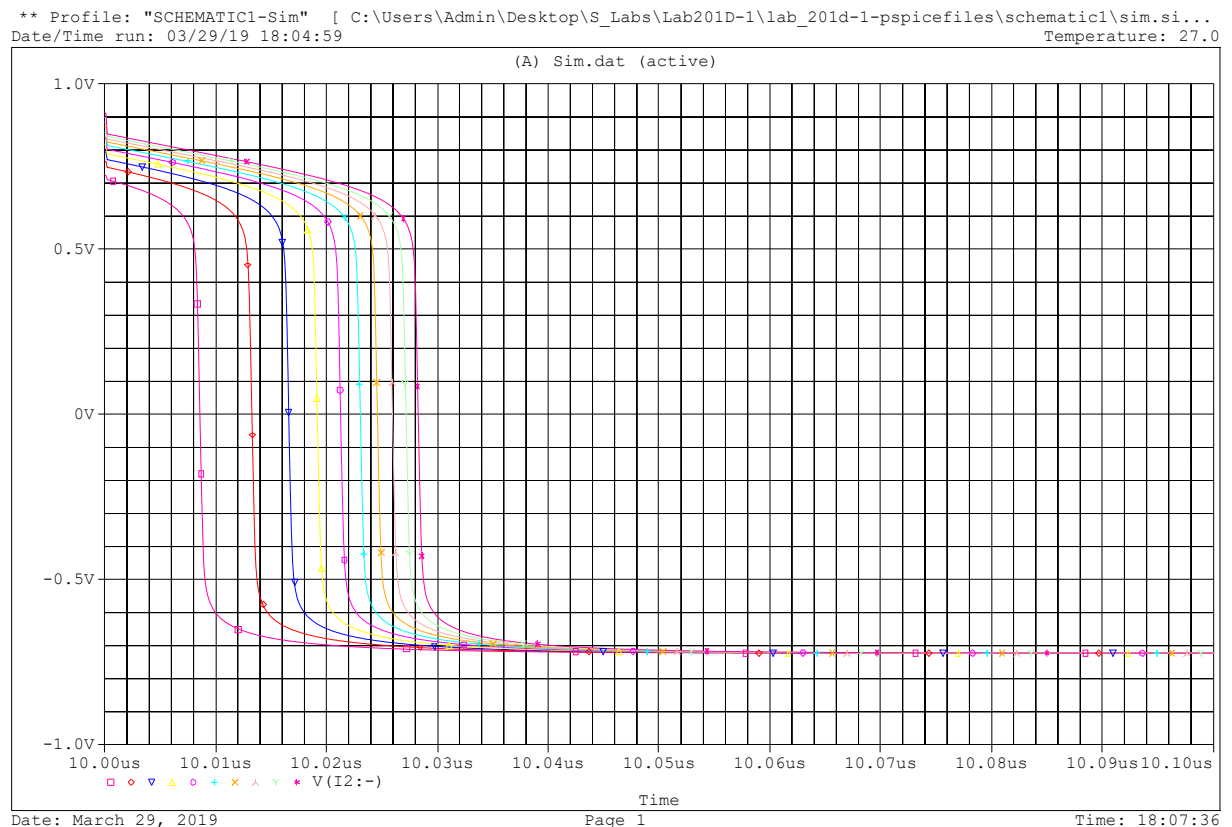


Рис. 14: D1N4149

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 18:20:55 Temperature: 27.0

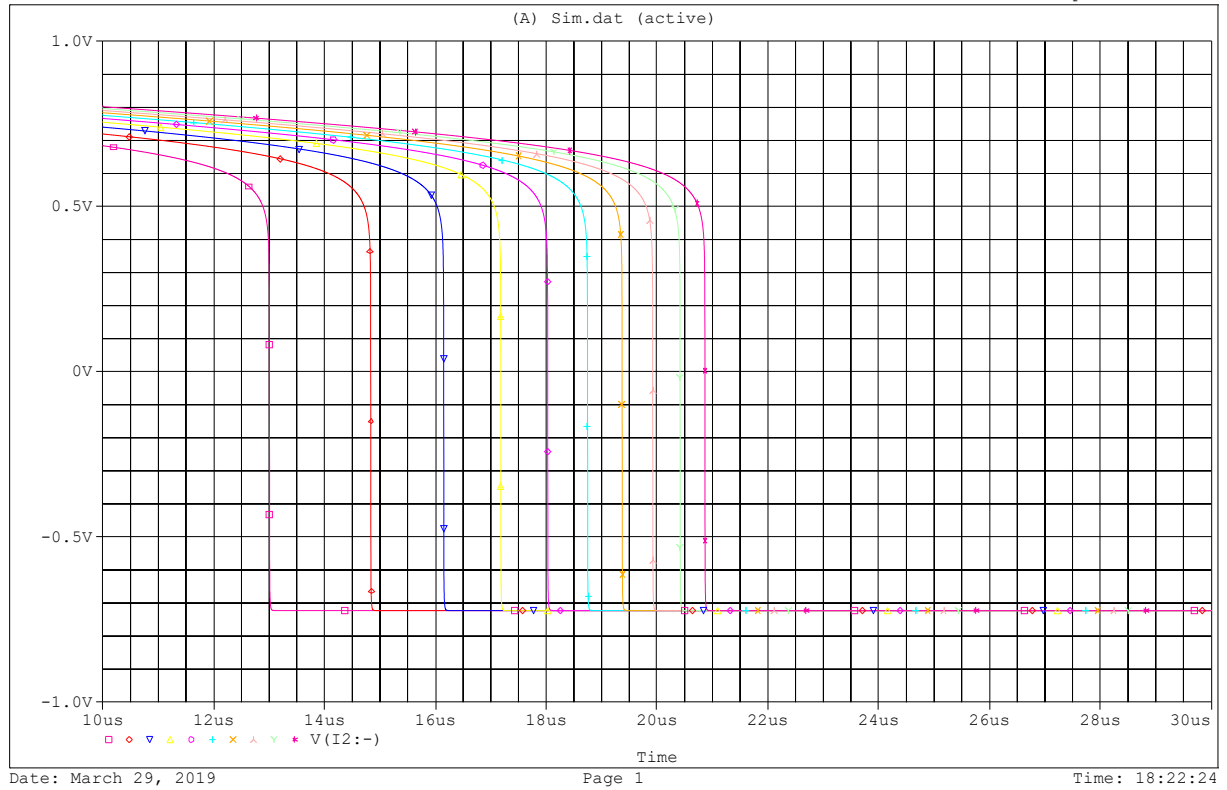


Рис. 15: D1N4002

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 18:27:00 Temperature: 27.0

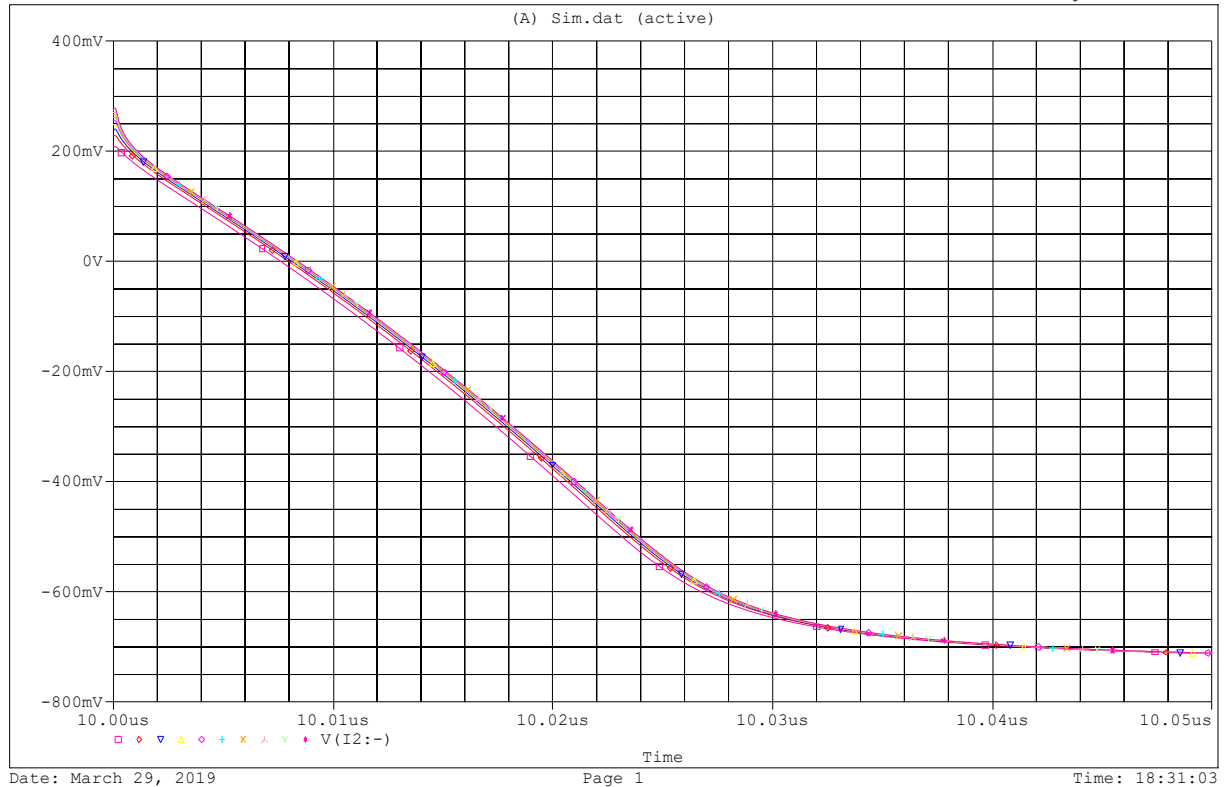


Рис. 16: D1N5818

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 18:35:12 Temperature: 27.0

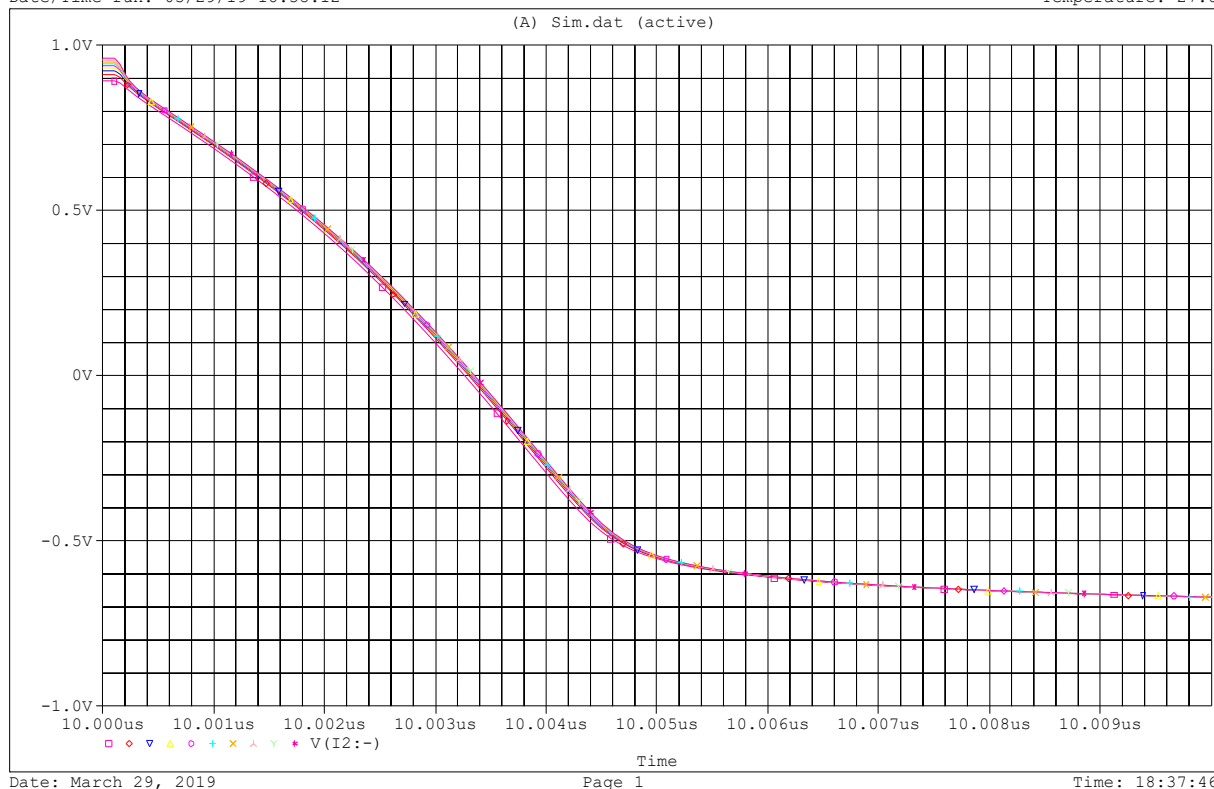


Рис. 17: D1N5443A

\*\* Profile: "SCHEMATIC1-Sim" [ C:\Users\Admin\Desktop\S\_Labs\Lab201D-1\lab\_201d-1-pspicefiles\schematic1\sim.si...  
 Date/Time run: 03/29/19 18:48:46 Temperature: 27.0

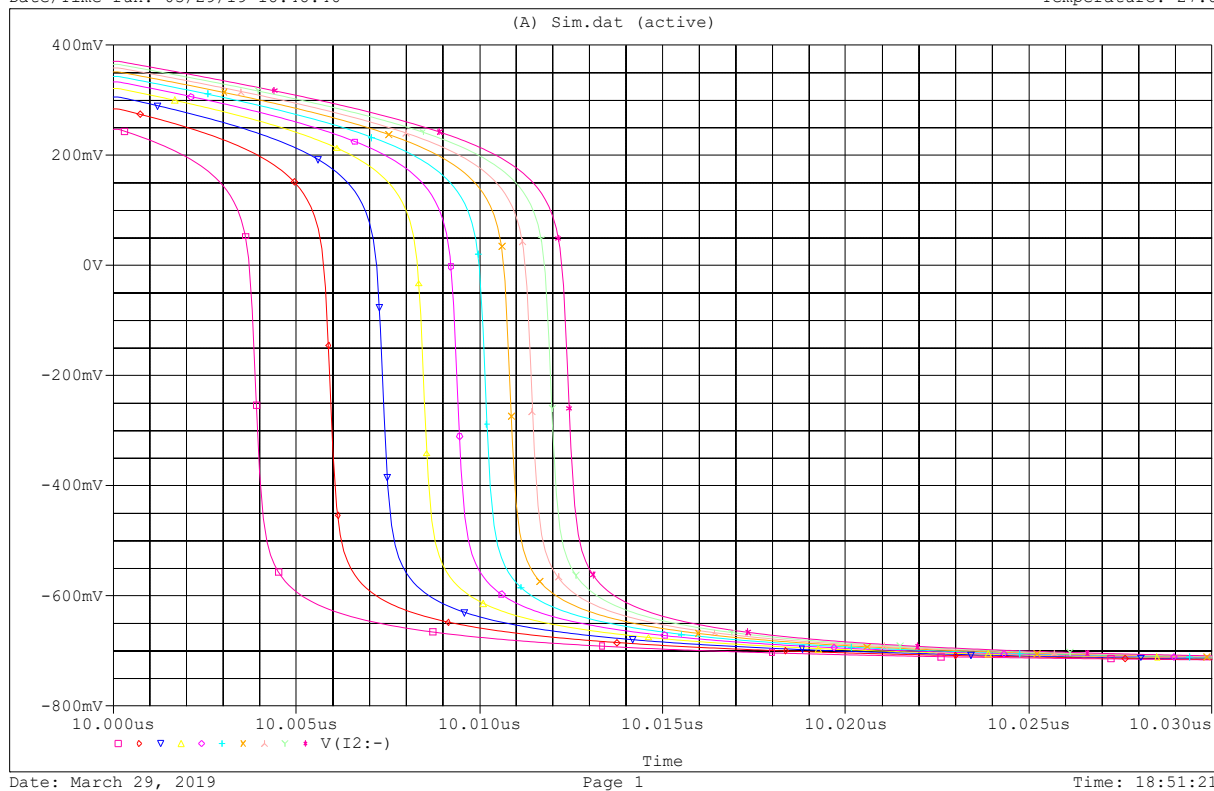


Рис. 18: D04AZ2\_2

**2.2.1.а.** Для импульсного ВЧ диода по скачку напряжения рассчитаем сопротивление  $R_s$ . Сравним с паспортными данными модели.

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0.872 - 0.816}{0.1} \Omega \approx 0.56 \Omega$$

$$R_s^{\text{табл}} = 0.5664 \Omega$$

**2.2.1.б.** Для импульсного ВЧ диода для  $I_1 = 10\text{mA}$  и дискретных значений  $I_{UP} = I_2 = 17.21\text{mA}$ ,  $100\text{mA}$  напечатаем на графике время разряда диффузионной ёмкости. Рассчитаем время жизни ННЗ для  $I_2 = 17.21\text{mA}$  и время разряда диффузионной ёмкости для  $I_2 = 100\text{mA}$ .

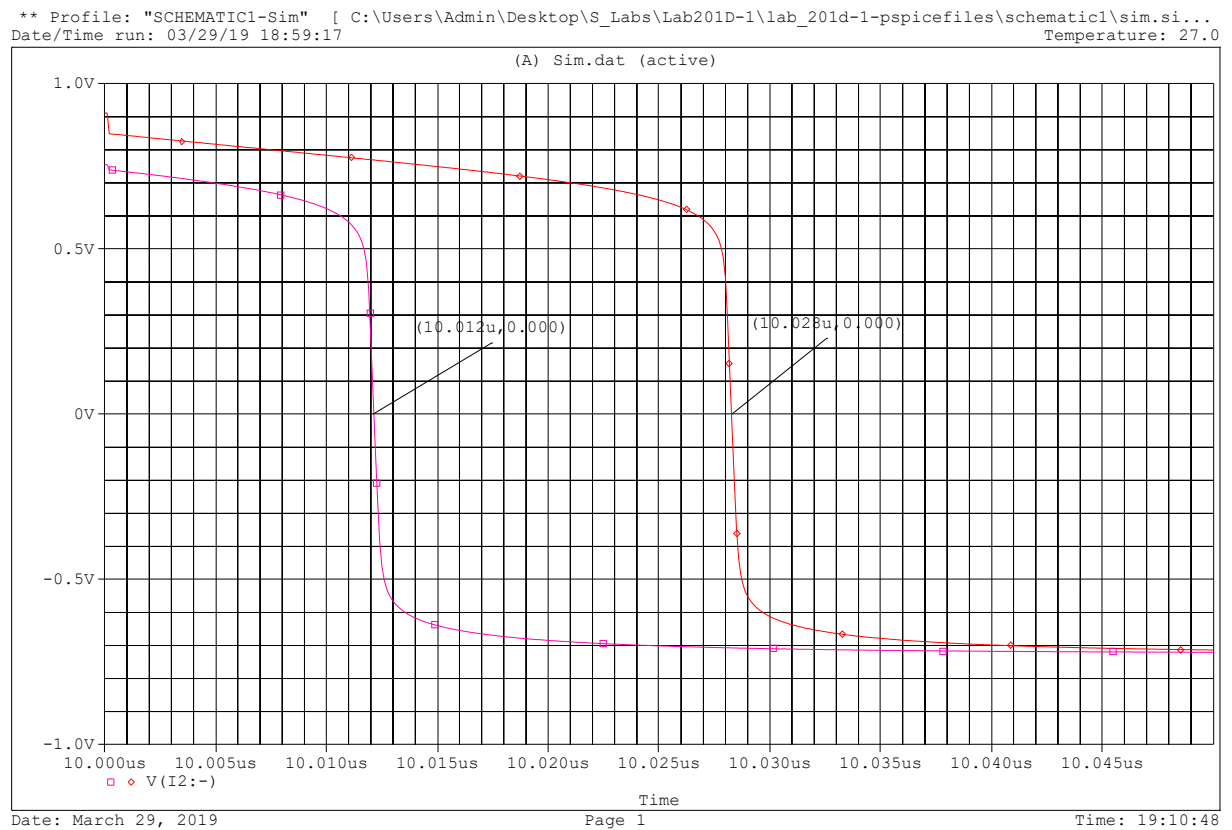


Рис. 19: D1N4149

$$\tau_{\text{pac}} = 6\text{ns}; \tau_p = \frac{\tau_{\text{pac}}}{1 + \ln\left(\frac{I_2}{-I_1}\right)} = 3.7\text{ns}$$

$$\tau_{\text{pac}} = 14\text{ns}; \tau_{\text{pac}} = \tau_p \cdot \left(1 + \ln\left(\frac{I_2}{-I_1}\right)\right) = 11.8\text{ns}$$

**2.2.1.в.** Оценим по результатам моделирования пункта 2.2.1 заряд неосновных носителей выпрямительного диода при заданном токе.

$$Q = |I_1 \cdot \tau_p| \approx 40pC \text{ для каждого из токов } I_2$$

**2.2.1.г.** Объясним различие графиков разряда ёмкостей диода Шоттки и обычных диодов.

В диодах Шоттки в качестве барьера Шоттки используется переход металл - полупроводник, в отличие от обычных диодов, где используется р-п-переход. Особенностью такого перехода является отсутствие накопления избыточного заряда в базе. Инерционные свойства такого диода связаны с зарядом в барьерной емкости. Переход металл-полупроводник обладает рядом особенных свойств (отличных от свойств полупроводникового р-п-перехода). К ним относятся: пониженное падение напряжения при прямом включении, высокий ток утечки, очень маленький заряд обратного восстановления. Последнее объясняется тем, что по сравнению с обычным р-п-переходом у таких диодов отсутствует диффузия, связанная с инжекцией неосновных носителей, т.е. они работают только на основных носителях, а их быстроедействие определяется только барьерной ёмкостью.

Теоретически диод Шоттки может обладать низкой электрической ёмкостью барьера Шоттки. Отсутствие р-п-перехода позволяет повысить рабочую частоту.

**2.2.2.** Для выпрямительного диода получим аналогичные временные диаграммы напряжения для дискретных значений  $I_1 = -10 \text{ mA}$ ,  $-50 \text{ mA}$ ,  $-100 \text{ mA}$  и  $I_2 = 100 \text{ mA} = \text{const}$ .

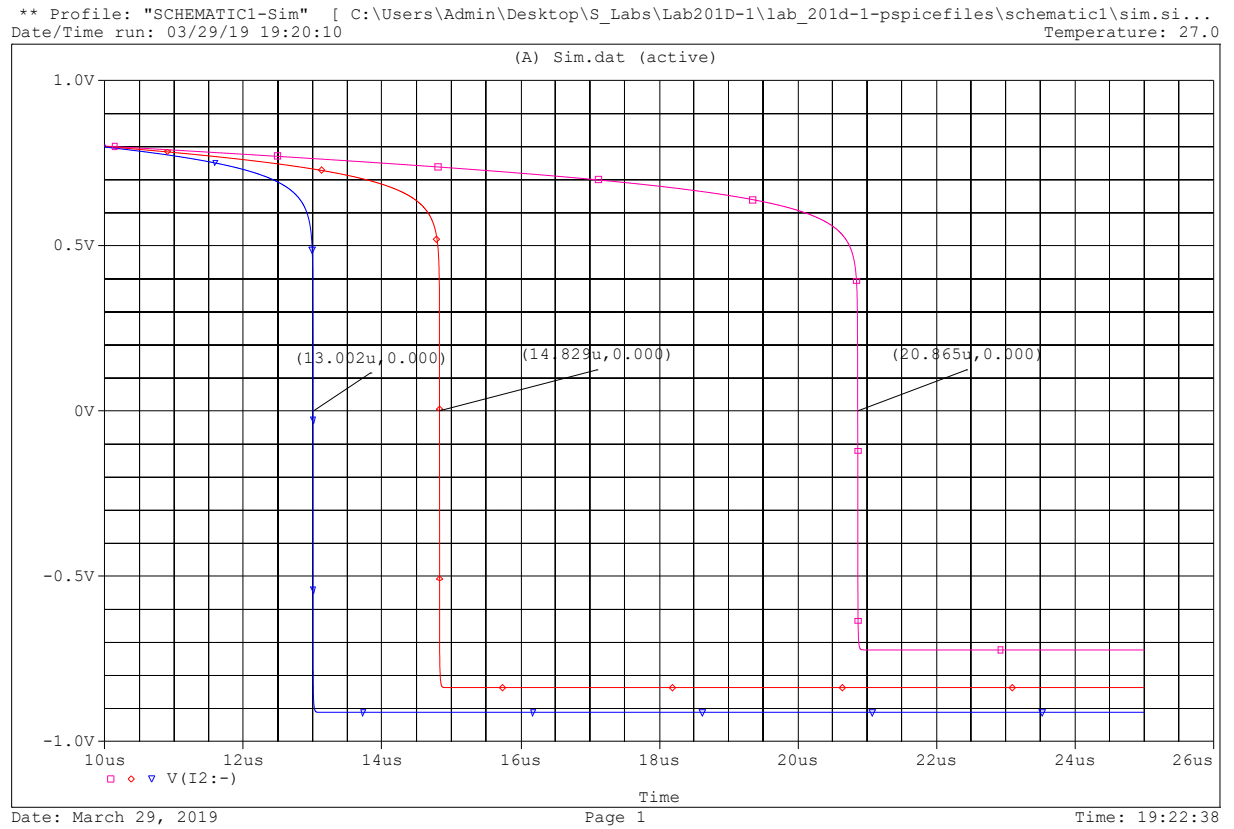


Рис. 20: D1N4002

$$\tau_{\text{pac}} = 3.56 \mu\text{s}; \tau_p = \frac{\tau_{\text{pac}}}{1 + \ln\left(\frac{I_2}{-I_1}\right)} = 1.72 \mu\text{s}$$

$$\tau_{\text{pac}} = 5.79 \mu\text{s}; \tau_p = \frac{\tau_{\text{pac}}}{1 + \ln\left(\frac{I_2}{-I_1}\right)} = 3.36 \mu\text{s}$$

$$\tau_{\text{pac}} = 13.37 \mu\text{s}; \tau_p = \frac{\tau_{\text{pac}}}{1 + \ln\left(\frac{I_2}{-I_1}\right)} = 5.78 \mu\text{s}$$