

SPICE МОДЕЛИ СИЛОВЫХ МОП ПТ

Введение

Стандартные модели МОП ПТ, имеющиеся в SPICE (Программа Моделирования с Акцентом на Интегральные Схемы) были изначально разработаны для латеральных, маломощных структур. Поэтому они неточно моделируют вертикальные МОП ПТ. Для того, чтобы SPICE могла моделировать схемы, содержащие мощные МОП ПТ фирмы International Rectifier, моделирующие параметры SPICE были добавлены к справочным данным третьего поколения МОП ПТ –HEXFET III. Таким образом, рабочие характеристики МОП ПТ в схеме могут быть проанализированы без необходимости создания дорогостоящего макета. Все параметры модели приведены в справочных данных, так что пользователю не нужно извлекать какие-либо элементы модели из графиков или других параметров справочных данных.

Тип использованной модели позволяет точное моделирование характеристик переключения МОП ПТ, что минимизирует требуемое для вычислений время. Модель пригодна для использования с большинством форм SPICE.

Моделирование силовых МОП ПТ в SPICE

Модели МОП ПТ, включенные в SPICE, в большей степени подходят для моделирования низковольтных латеральных МОП ПТ, которые могут встретиться в интегральных схемах, чем для вертикальных DМОП силовых МОП ПТ. Имеющиеся модели не могут моделировать некоторые особенности силового МОП ПТ, такие как переменная емкость сток-затвор и диод подложка-сток.

При отсутствии подходящей встроенной модели силовой МОП ПТ обычно моделируется с помощью комбинирования дополнительных элементов с имеющейся моделью МОП ПТ, чтобы дать возможность более успешного представления таких особенностей силового МОП ПТ, как переменная емкость сток-затвор, диод подложка-сток и паразитные индуктивности.

В то время как основным тестом модели МОП ПТ для малосигнальных применений является его поведение в линейном режиме, оценка модели силового МОП ПТ обычно базируется на ее способности точно воспроизводить переключение прибора. Емкость сток-затвор (емкость Миллера) является критическим фактором в определении поведения силового МОП ПТ при переключении. Эта емкость меняется с изменением напряжения сток-затвор и, поэтому удачная модель силового МОП ПТ требует точного метода представления изменений Cgd. Однако, это должно быть достигнуто без предъявления излишних требований к вычислительным ресурсам главного компьютера.

Диод подложка-сток силового МОП ПТ требует особого внимания. В идеале модель должна быть способна воспроизводить характеристики обратного восстановления диода, так как токи восстановления диода и связанные с ними потери могут быть значительными в некоторых схемных применениях. Однако, это обстоятельство может быть опущено, чтобы уменьшить время вычислений.

Другие свойства МОП ПТ, которые представляются добавлением дополнительных элементов к модели, включают индуктивности корпуса. Это важные элементы в определении переключения силового МОП ПТ из-за больших величин di/dt. В частности, индуктивность истока является главным фактором в определении максимальной скорости переключения прибора.

Модель МОП ПТ

Новая SPICE модель МОП ПТ показана на рис. 1. Располагаемая модель МОП ПТ уровня 3 выделена пунктирной линией. Остальные элементы модели представляют следующее:

Lg: Индуктивность вывода и разварочной проволоки затвора.

Rg: Внутреннее последовательное сопротивление затвора (сопротивление поликремниевого затвора).

Ld: Индуктивность вывода и разварочной проволоки стока.

Rl: Объемное сопротивление эпитаксиального слоя.

Rs: Объемное сопротивление диода.

Is: Источник тока, представляющий взаимоотношение между током диода и напряжением диода.

R2: Сопротивление вывода и разварочной проволоки истока.

Is: Индуктивность вывода и разварочной проволоки истока.

Cx: Масштабная величина емкости, используемая для моделирования Cgd. Это -полиномиальный конденсатор, коэффициенты которого приводятся в индивидуальных справочных данных в виде $(V_{ge})^a$, где a -степень полинома.

E1: Источник напряжения с полиномиальной зависимостью напряжения. Этот элемент не имеет физической реальности, но используется для модифицирования напряжения на Cx таким способом, что комбинация Cx и E1 эмулирует поведение Cgd в реальном приборе. Его коэффициенты даются в индивидуальных справочных данных в виде $(V_{dg})^n$.

Емкость Миллера, Cgd, представляется полиномом на основе напряжения сток-затвор. Высокий порядок полинома используется для моделирования быстрого перехода Cgd от высокого значения к низкому при возрастании Vdg. Это достигается

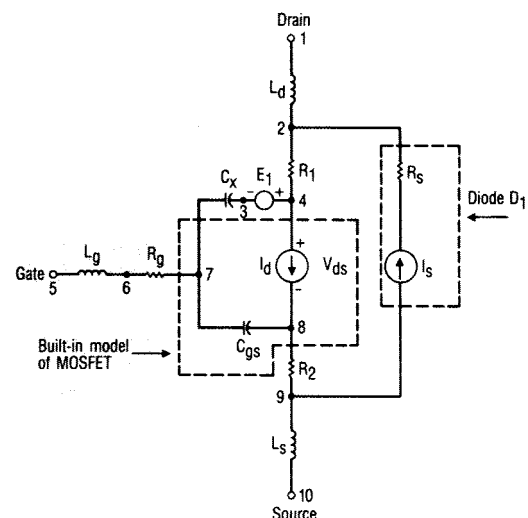


Рис. 1. Модель МОП ПТ

Типовые параметры компьютерной SPICE модели

Device	Level, SPICE MOSFET Model	W (m), Channel Width	L (μm), Channel Length	Theta (1/V), Mobility Modulation	UO (CM ² /V-S), Surface Mobility	VTO (V), Threshold Voltage	R1 (Ω), Drain Resistance	R2 (Ω), Source Resistance	RG (Ω), Gate Resistance
All	3	0.532	1.2	0.12	450	3.47	0.055	0.02	1

CGSO (pf), Gate-Source Capacitance	CGD (F) Gate-Drain Capacitance	E1 (V), Voltage Dependent Voltage Source	LD (nH), Drain Inductance	LS (nH), Source Inductance	LG (nH), Gate Inductance	IS (A), Diode Saturation Current	RS (Ω), Diode Bulk Resistance
730	C _x	4 + 0.95 VDG	4.5	7.5	7.5	1.4 x 10 ⁻¹³	0.016

$$C_x = 600 \text{ pf} + 2.38 \times 10^{-20} (V_{GE})^{20} - 1.1 \times 10^{-21} (V_{GE})^{22}$$

Рис. 2. Справочные данные для параметров компьютерной модели SPICE для IRF 530

использованием зависящего от напряжения конденсатора C_x, соединенного последовательно с управляемым напряжением источником напряжения. Это оказывает воздействие на емкость сток-затвор, вызывая ее уменьшение с возрастанием напряжения сток-затвор. Хотя величина C_x далека от реальной величины Cgd, E1 определяется таким способом, что заряд, который втекает и вытекает из C_x при изменении Vdg, идентичен тому, который втекает и вытекает из Cgd в реальном приборе. Более подробное описание работы этой части модели дано в приложении.

Параметры SPICE модели для справочных данных

Рис.2 показывает пример данных SPICE модели, приведенных в справочных данных МОП ПТ. Показанные численные значения являются типовыми. Параметры модели базируются на физических свойствах и размерах прибора с некоторыми изменениями, позволяющими достичь близкого соответствия с измеряемыми электрическими характеристиками, приведенными в справочных данных.

- Нижеприведенные параметры составляют располагаемую модель МОП ПТ:
- Уровень SPICE модели МОП ПТ (LEVEL)
- Ширина канала (W)
- Длина канала (L)
- Коэффициент модуляции подвижности (ТНЕТА)
- Поверхностная подвижность (UO)
- Пороговое напряжение (VTO)
- Емкость затвор-исток (CGSO)

Остальные параметры являются элементами, которые необходимо добавить к располагаемой модели, чтобы получить модель, которая ближе соответствует вертикальному DМОП силовому МОП ПТ. Эти элементы перечислены в предыдущем разделе. Элемент, названный емкостью затвор-сток, является конденсатором, зависящим от напряжения. В некоторых справочных данных его обозначают C1, C2, C3 и т.п. в зависимости от типа прибора. Название «Емкость затвор-сток» не должно приводить пользователя к мысли, что эта величина та же самая, что дана как Cgd в разделе «Электрические характеристики» в справочных данных. Как объяснено в предыдущем разделе, C_x является искусственной величиной, используемой совместно с управляемым напряжением источником напряжения E1 для эмуляции поведения Cgd. Как показывает уравнение C_x является полиномиальной функцией Vge, которая является напряжением между узлами 3 и 7 модели (См. рис.1). Полином обычно содержит один или два компонента различных степеней. Примеры представления модели Cgd даны на рис.3 и рис.4. Несмотря на то, что кривые, созданные моделью, не точно соответствуют действительному изменению емкости, на практике получаемые в результате ошибки в сигналах переключения малы.

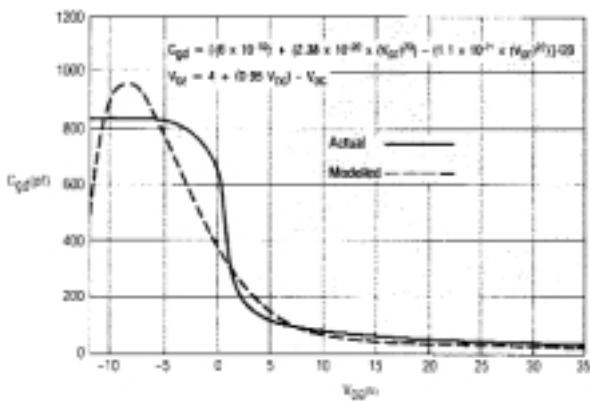


Рис. 3. Зависимость емкости затвор-сток от напряжения сток-затвор (IRF 530)

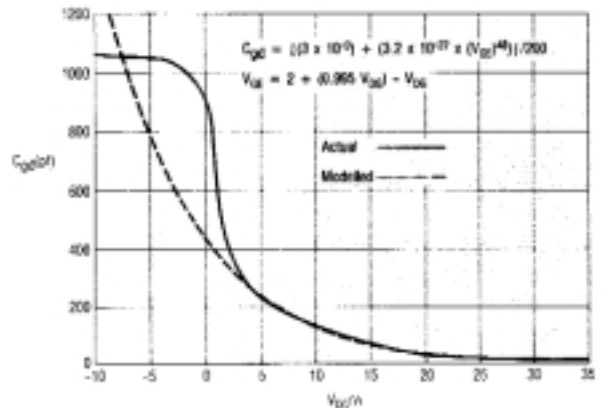


Рис. 4. Зависимость емкости затвор-сток от напряжения сток-затвор (IRF 730)

```

*****
*      IRF530      *
*****
*
M530 4 7 8 8 IRF530 W=.532 L=1.2U
.MODEL IRF530 NMOS (LEVEL=3 THETA=.12
+UO=450 VTO=3.47 CGSO=730PF)
D1 9 2 DSD
.MODEL DSD D IS=1.4E-12 RS=1.6E-2
LD 1 2 4.5NH
R1 2 4 .055
R2 8 9 .02
LS 9 10 7.5NH
E1 4 3 4 7 4 .95
CGD 7 3 POLY 600PF 0 0 0 0 0 0 0 0
+0 0 0 0 0 0 0 0 2.38E-20 0 -1.1E-21
RG 7 6 1.0
LG 6 5 7.5NH
*

```

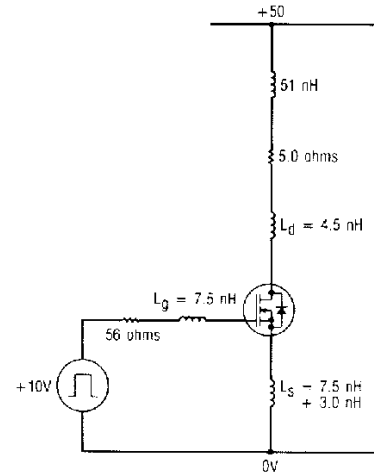


Рис. 5. Тестовая схема испытаний мощных МОП ПТ

Загрузка модели

Ниже приводится листинг модели МОП ПТ для IRF530. SPICE параметры справочных данных для этого прибора показаны на рис.2.

Точность модели

Модель МОП ПТ может быть протестирована на соответствие реальности на простой схеме испытаний, показанной на рис.5. Результаты теста по этой схеме показаны на рис.6. Как показывают формы сигналов, имеется соответствие между теоретическими и действительными сигналами, которая указывает, что модель дает результаты в режиме переключения, которые достаточно точны для многих цепей.

Ограничения модели

Вследствие способа, в котором Cgd моделируется с помощью Cx и E1, модель снимет одно ограничение. Как можно видеть из рис.3 и рис.4, наблюдаемая величина Cgd становится очень большой (либо положительной, либо отрицательной), как только Vdg достигает величины примерно -10 В, Когда МОП ПТ находится во включенном состоянии, это соответствует напряжению затвора, примерно равному +10 В, так как сток будет находиться примерно под потенциалом истока. Общй отказ модели наиболее вероятно произойдет, если напряжение затвора становится много больше 12В.

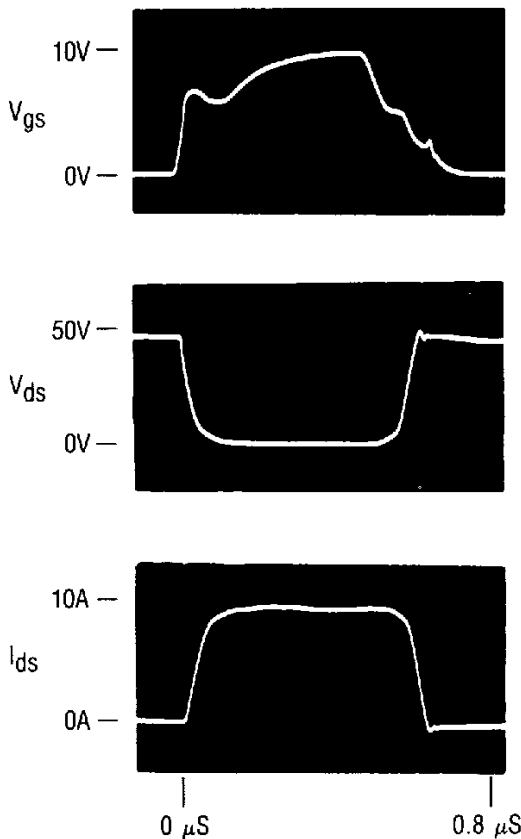


Рис. 6(a). Формы сигналов, полученных на схеме рис. 5

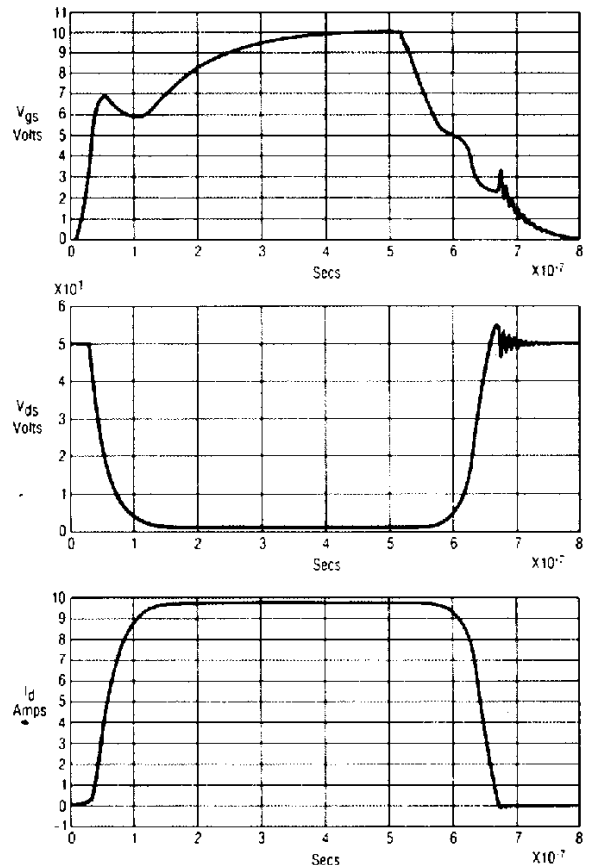


Рис. 6(b). Рассчитанные формы сигнал в схеме на рис.5

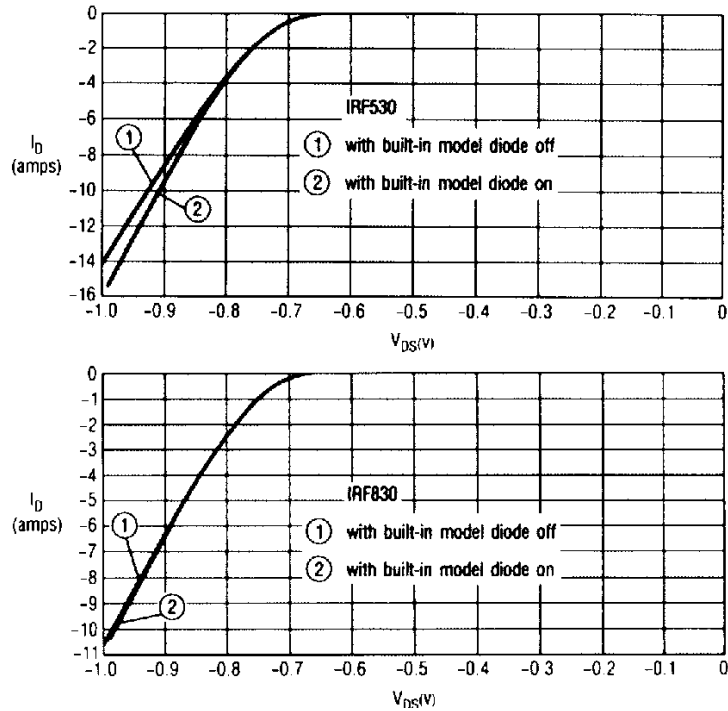


Рис. 7. Ошибки, вносимые в параметры модели проводимости объемного диода МОП ПТ

Следует также отметить, что при некоторых напряжениях стока, превышающих пробивные напряжения прибора, величина C_{gd} , даваемая моделью, также становится очень большой. Однако, это вряд ли будет серьезным ограничением, так как прибор не может на практике работать при напряжении стока, большем пробивного напряжения.

Выводы

Новая SPICE модель для МОП ПТ позволяет пользователю SPICE моделировать рабочие характеристики силового МОП ПТ фирмы International Rectifier в режиме переключения со степенью точности, приемлемой для многих применений. Модель представляет собой компромисс между стремлением к точности и необходимостью минимизировать время вычислений. Вследствие этого диапазон напряжения затвор-исток ограничивается величиной примерно 12 вольт. Выборка из справочных данных HEXFET III представляет данные модели. Информация модели со временем появится для всей номенклатуры HEXFET III.

Приложение

Расчеты модели МОП ПТ

Введение

Модель показана на рис.1. Внутренние компоненты располагаемой модели МОП ПТ выделены пунктирной линией. Подложка встроенной модели привязана к ее истоку, так что параметры, относящиеся к этому переходу, являются нулевыми.

Параметры модели рассчитываются, в первую очередь, исходя из физических свойств прибора, с добавлениями, где необходимо, чтобы обеспечить хорошее соответствие с измеренными характеристиками.

Источник тока, управляемый напряжением

В омической области действие источника тока, зависящего от напряжения, I_d , описывается следующим уравнением:

$$I_d = \frac{KP}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot V_{ds} [2(V_{gs} - V_{TO}) - V_{ds}] \quad (1)$$

При насыщении I_d описывается так:

$$I_d = \frac{KP}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{gs} - V_{TO})^2 \quad (2)$$

Используя уровень-3 для моделирования N-МОП ПТ и выражая KP через его компоненты, из (2) получим:

$$I_d = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{ox}}{T_{ox}} \cdot \frac{U_o}{[1 + THETA (V_{gs} - V_{TO})]} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{gs} - V_{TO})^2 \quad (3)$$

Параметры, не учтенные в уравнении (3), следующие:

$\epsilon_{ox} = 3.4E-8$ (Ф/см²) [емкость окисла на единицу площади]

$T_{ox} = 1E-7$ (м) [толщина окисла]

Входные параметры следующие:

U_0 : Поверхностная подвижность (см²/Вс).

Это технологический параметр, зависящий от степени легирования кремния. Обычно $U_0 = 450$ (см²/Вс).

THETA: Коэффициент модуляции подвижности (1/В)

Это параметр, который модулирует поверхностную подвижность. При возрастании V_{gs} эффективная поверхностная подвижность падает. Это обнаруживается регулированием THETA вокруг типового значения 0,1.

V_{to} : Пороговое напряжение (В).

Пороговое напряжение модели обычно на 0,5 В выше величины порога, определенной в справочных данных. Для конкретного прибора оно может иметь отклонения,

W : Ширина канальной области транзистора (м)

Она определяется из измерений размеров кристалла HEXPETA.

L : Длина области канала транзистора (м).

Обычно: $L = 1,2$ мкм

Сопротивления

R_1 : Оно представляет собой сопротивление, встречающееся на пути тока, протекающего через эпитаксиальную область дрейфа. R_1 и R_2 вместе с параметрами для I_d определяют работу прибора по постоянному току.

$$R_1 = R_{ds(on)} - R_{CHANNEL} \quad (4)$$

$$R_{CHANNEL} = \frac{1}{\left[\frac{KP}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{gs} - V_{to}) \right]} \quad (5)$$

$KP = 1,55E-5$ для всех моделей (вычисленных с помощью SPICE из технологического параметра U_0).

Величина R_1 затем уточняется, чтобы дать наилучшие результаты в омической области.

R_2 : Этот параметр представляет паразитное сопротивление в истоке. Его величина для всех приборов в корпусе TO-220AB равна 0,02 Ом.

R_g : Сопротивление затвора МОП ПТ, которое определяется установкой индуктора в затвор прибора, подавая синусоидальное напряжение на затвор и делая измерения тока и напряжения в точке резонанса. R_g может затем быть определено вычислением демпфирующего коэффициента схемы. Величина R_g меняется от 0,5 до 3 Ом для различных приборов. R_g ограничивает скорость, с которой могут быть заряжены и разряжены емкости перехода и, следовательно, влияет на рабочие характеристики переключения.

Индуктивности

L_d : Паразитная индуктивность стока, которая вычисляется из измерений проволоки вывода. Для корпуса TO-220AB $L_d = 4,5$ нГн.

L_s : Величина паразитной индуктивности истока для корпуса TO-220AB равна 7,5 нГн.

L_g : Индуктивность затвора равная индуктивности истока, поэтому для корпуса TO-220AB $L_g = 7.5$ нГн.

Внешние паразитные индуктивности, которые происходят от разводки схемы, могут также учитываться. Их влияние на рабочие характеристики схемы такое же, как и индуктивностей корпуса L_s , L_d и L_g .

Емкости

Коэффициенты для полинома, описывающие C_{gd} , находят подбором кривой. Процедуры извлечения коэффициентов сложны, так как делается близкая аппроксимация к реальным графикам C_{gd} . Однако, извлечения коэффициентов для грубой оценки C_{rss} даны в литературе [2]. Так как изменение напряжения на C_x подавлялось с коэффициентом 200 (коэффициентом 20 для низковольтных приборов), величина емкости увеличивалась на коэффициент 200 (коэффициент 20 для низковольтных приборов) по сравнению с действительной величиной C_{gd} , чтобы дать точную величину емкости затвор-сток.

C_{gs} : Емкость затвор-исток достаточно независима от изменений напряжения и тока.

Она определяется следующим образом:

$$C_{gs} = C_{iss} - C_{rss} \quad (6)$$

Величина C_{gs} затем вводится как емкость на единицу ширины канала, C_{gso} , следующим образом:

$$C_{gso} = \frac{[C_{gs} - (C_{ox} \cdot W \cdot L)]}{W} \quad (7)$$

Cds: Емкость сток-исток также является уменьшающейся функцией напряжения. В режиме переключения влияние Cgd включает влияние Cds. Поэтому Cds может не учитываться для уменьшения исчисления времени.

D1: Интегральный диод МОП ПТ исток-сток моделируется диодом D1. Диод подложка-сток имеемой модели МОП ПТ не может использоваться для этой цели, так как соответствующее ему сопротивление R1 было установлено для того, чтобы дать удовлетворительное моделирование выходных характеристик МОП ПТ в линейной области. В результате, диод подложка-сток должен быть выключен заданием $I_s = 0$ и используется отдельный диод для моделирования диода подложка-сток МОП ПТ. Ток насыщения для D1 определяется так:

$$I_s = \exp \left[\ln (I_{d1}) - \frac{V_{d1}}{V_t} \right] \quad (8)$$

где, $V_t = 26$ мВ (тепловое напряжение). I_{d1} и V_{d1} представляют точку данных малого тока. Объемное сопротивление диода

$$R_s = \frac{\left[V_{d2} - V_t \cdot \ln \left(\frac{I_{d2}}{I_s} \right) \right]}{I_{d2}} \quad (9)$$

где I_{d2} и V_{d2} представляют точку данных большого тока.

В некоторых версиях SPICE появляются трудности так как диод подложка-сток имеемой модели не прекращает проводить ток, когда I_s устанавливается в ноль. К счастью, величина тока, проводимого этим диодом, мала по сравнению с током, который протекает в диоде модели D1. Причиной этого является то, что R1 обычно велико по сравнению с R_s . Это особенно справедливо для высоковольтных приборов. Рис.7 показывает ошибку, создаваемую версиями SPICE, в которых диод подложка-сток встроенной модели МОП ПТ не выключается для двух приборов: IRF530 с номиналом 100 В и IRF830 с номиналом 500 В.