

# Компактная модель вертикального кремниевого ДМОП-транзистора

Иванова В.В., Мартемьянов И.С., Турин В.О., Зебрев Г.И.\*, Цырлов А.М.\*\*

ГУ УНПК, \*НИЯУ «МИФИ», \*\* ОАО «ПРОТОН»

## Внутренняя модель ДМОП транзистора

“Внутренняя” модель Шокли:  $R_S = R_D = 0$ .

Ток как функция внутренних напряжений:

$$I = \begin{cases} I_1 = \beta(V_{GT}V_{DS} - V_{DS}^2/2), & V_{DS} < V_{SAT}; \\ I_{SAT}, & V_{DS} \geq V_{SAT}. \end{cases}$$

$V_{DS}$  — напряжение сток-исток,  $V_{GT} = V_{GS} - V_{TH}$  — напряжение затвор-исток ( $V_{GS}$ ), центрированное по отношению к пороговому напряжению  $V_{TH}$ .

$$\beta = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 W \mu}{dL}$$

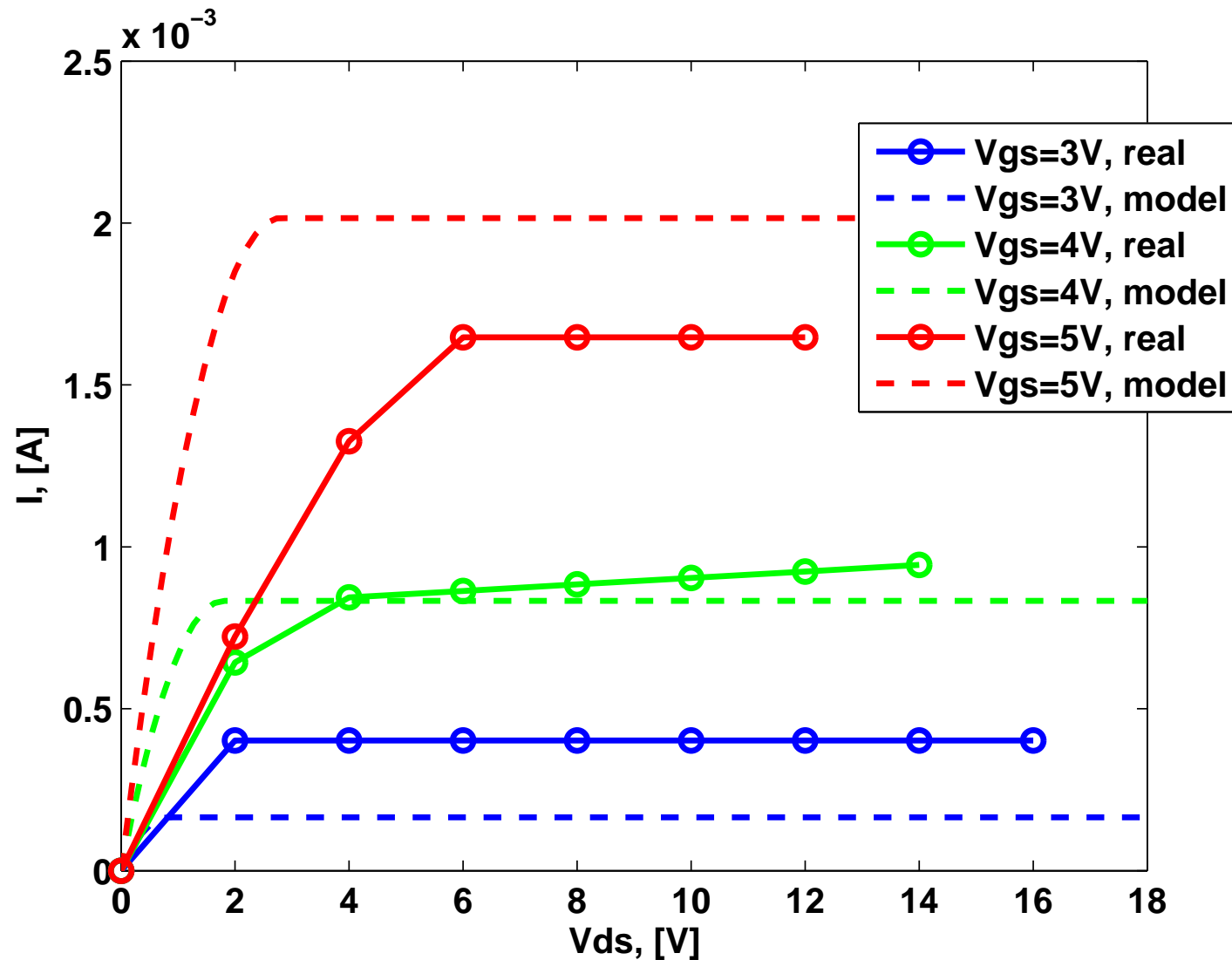
$\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала,  $\varepsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $W$  — ширина ячейки,  $\mu$  — подвижность носителей,  $d$  — толщина подзатворного окисла,  $L$  — длина канала.

Ток и напряжение насыщения:

$$I_{SAT} = \frac{\beta V_{GT}^2}{2}, \quad V_{SAT} = V_{GT}.$$

## Применение внутренней модели к реальному ДМОП транзистору

Параметры ячейки:  $\epsilon = 3.9$  (относительная диэлектрическая проницаемость кремния),  
 $W = 100$  мкм,  $\mu = 405$  см<sup>2</sup>/Вс,  $d = 68$  нм,  $L = 4.0$  мкм,  $V_{TH} = 2.2$  В.



## Внешняя модель ДМОП транзистора

Связь между внешними и внутренними напряжениями:

$$V_{ds} = V_{DS} + IR_D ;$$

$$V_{gt} = V_{GT} .$$

Ток как функция внешних напряжений:

$$I = \begin{cases} I_1 , & V_{ds} < V_{sat} ; \\ I_{sat} , & V_{ds} \geq V_{sat} . \end{cases}$$

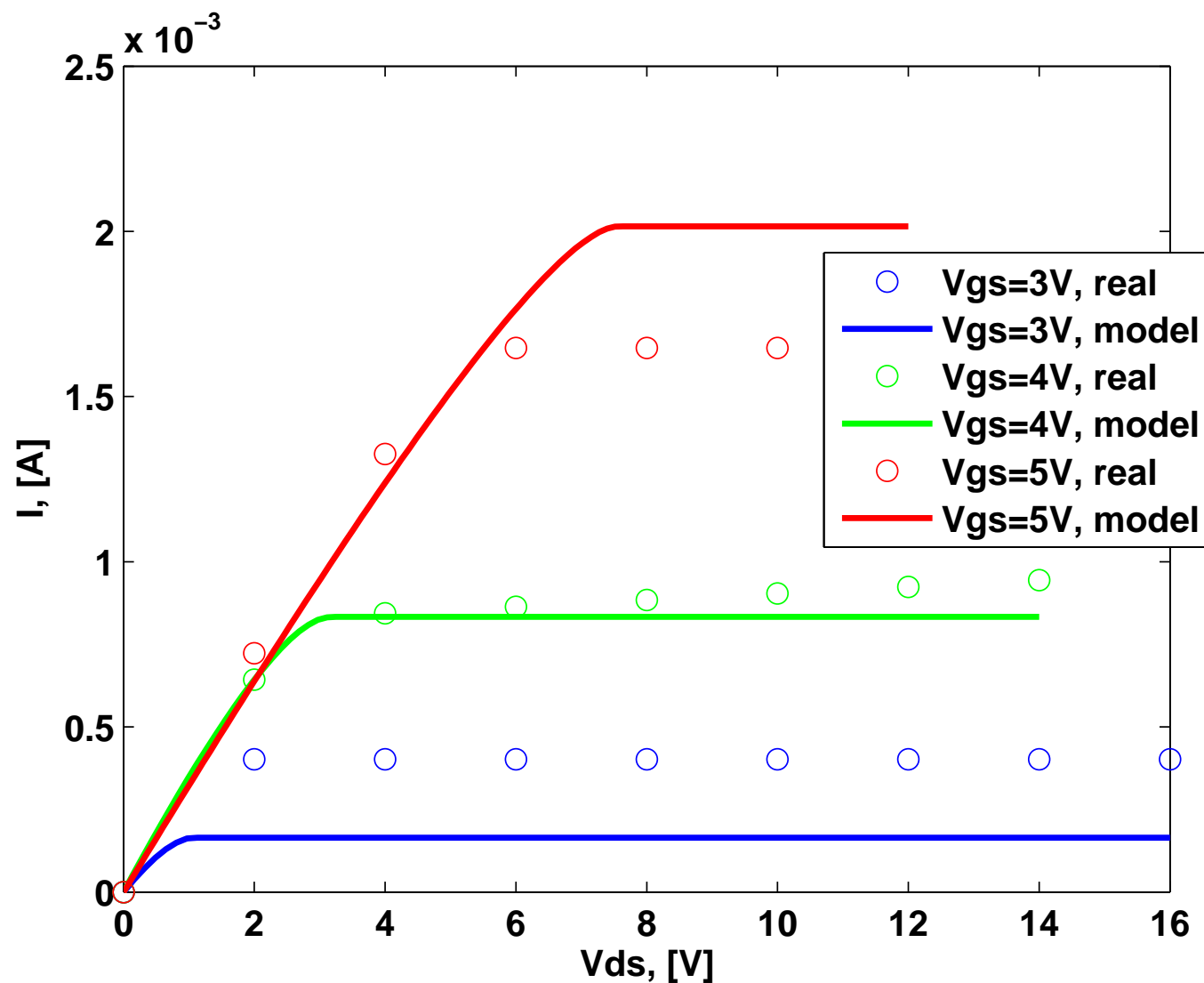
$$I_1 = \max \left[ \frac{1 + \beta R_D (V_{gt} - V_{ds})}{\beta R_D^2} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\beta^2 R_D^2 (V_{ds}^2/2 - V_{gt}V_{ds})}{[1 + \beta R_D (V_{gt} - V_{ds})]^2}} \right) \right] .$$

Ток и напряжение насыщения во внешней модели:

$$I_{sat} = \frac{\beta V_{gt}^2}{2} ;$$

$$V_{sat} = V_{gt} + I_{sat} R_D = V_{gt} (1 + \beta R_D V_{gt} / 2) .$$

## Применение внешней модели к реальному ДМОП транзистору



Оценка сопротивления стока: для нижней и средней кривых —  $R_D \sim 1650 \text{ Ом}$ ,  
для верхней —  $R_D \sim 2300 \text{ Ом}$ .

## Внутренняя модель ДМОП транзистора с учетом саморазогрева

Пороговое напряжение и подвижность носителей линейно убывают с ростом температуры:

$$\mu(\Delta T) = \mu_0(1 - k_1\Delta T);$$

$$V_{TH}(\Delta T) = V_{TH0}(1 - k_2\Delta T),$$

$\mu_0$  и  $V_{TH0}$  — подвижность носителей и пороговое напряжение холодного прибора,  $k_1$  и  $k_2$  — постоянные температурные коэффициенты.

Изменение температуры  $\Delta T$  зависит от выделяемой мощности  $P$  и теплового сопротивления  $R_t$ :

$$\Delta T = PR_t = IV_{DS}R_t$$

Линейный участок:

$$I = \beta_0(1 - k_1IV_{DS}R_t)[V_{GS} - V_{TH0}(1 - k_2IV_{DS}R_t)]V_{DS}$$

Участок насыщения:

$$I = \frac{1}{2}\beta_0(1 - k_1IV_{DS}R_t)[V_{GS} - V_{TH0}(1 - k_2IV_{DS}R_t)]^2$$

## Внешняя модель ДМОП транзистора с учетом саморазогрева

Ток стока на линейном участке как функция внешних напряжений:

$$I = \beta_0(1 - k_1\Delta T)[V_{gs} - V_{th0}(1 - k_2\Delta T)](V_{ds} - IR_D)$$

Уравнение пятой степени:

$$a_0I^5 + a_1I^4 + a_2I^3 + a_3I^2 + a_4I + a_5 = 0,$$

с коэффициентами:

$$a_0 = k_1k_2V_{th0}R_t^2R_D^3;$$

$$a_1 = -3k_1k_2V_{th0}R_t^2R_D^2V_{ds};$$

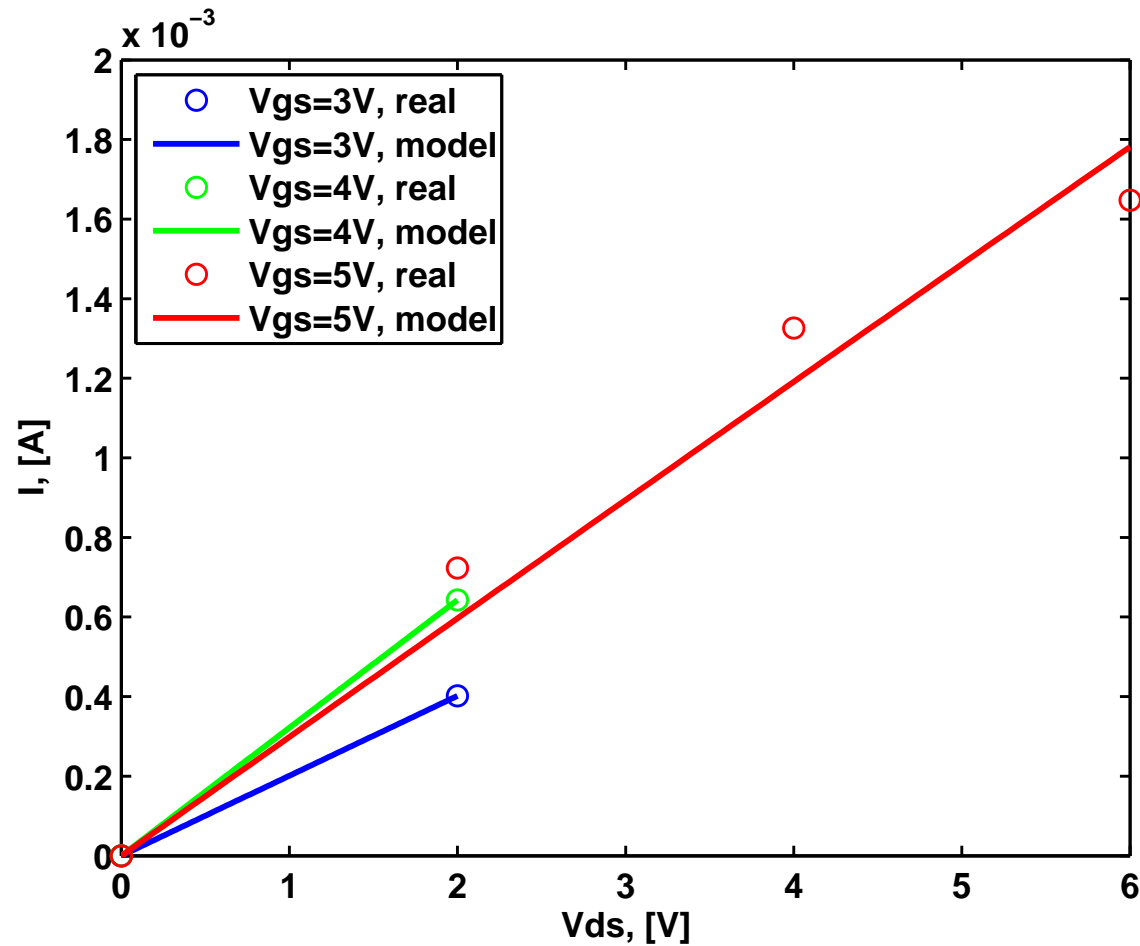
$$a_2 = 3k_1k_2V_{th0}R_t^2R_DV_{ds}^2 + R_tR_D^2C;$$

$$a_3 = -k_1k_2V_{th0}R_t^2V_{ds}^3 - 2V_{ds}R_tR_DC;$$

$$a_4 = R_tV_{ds}^2C - R_D(V_{gs} - V_{th0}) - \frac{1}{\beta_0};$$

$$a_5 = (V_{gs} - V_{th0})V_{ds}, \quad C = k_2V_{th0} - k_1V_{gs} + k_1V_{th0}.$$

## Применение внешней модели с учетом саморазогрева к реальному ДМОП транзистору: линейный участок



Температурные параметры:  $k_1 = 8.3e^{-3} \text{K}^{-1}$ ,  $k_2 = 1.09e^{-3} \text{K}^{-1}$ ,  $R_t = 1000 \text{ K/W}_T$ .

Оценка сопротивления стока:  $R_D \sim 2000 - 2500 \text{ Ом}$ .



# Применение внешней модели с учетом саморазогрева к реальному ДМОП транзистору: участок насыщения

