

УДК 621.382

В.Г. Вербицкий, д-р техн. наук, Л.И. Самотовка, В.Л. Самотовка

## Пороговое напряжение МОП транзисторов с наноразмерными толщинами подзатворного диэлектрика

В работе исследованы параметры для расчета порогового напряжения МОП транзисторов с наноразмерными толщинами подзатворного диэлектрика. Предложен способ определения порогового напряжения МОП транзисторов на основе метода разностной частоты.

In this work the characterization parameters for MOSFET threshold voltage calculation with nanoscale gate oxide width were investigated. The technique for MOSFET threshold voltage determination that is based on the difference frequency method was offered.

### Введение

В КМОП интегральных схемах (ИС) одним из основных электрофизических параметров определяющим минимально допустимые напряжения питания, уровень токов потребления, помехозащищенность ИС и др., является пороговое напряжение МОП-транзисторов (МОПТ). Известно несколько различных способов моделирования и методов определения пороговых напряжений неоднозначных между собой [1].

В процессе проектирования КМОП ИС на основе объемного монокристаллического кремния и на КНИ-структурах для моделирования порогового напряжения МОПТ наиболее часто используют определение порогового напряжения, как напряжение на затворе МОП структуры, при котором поверхностный потенциал в полупроводнике на границе раздела диэлектрик-полупроводник достигает удвоенного значения потенциала Ферми в объеме и на поверхности полупроводника в условиях плоских зон. С учетом напряжения плоских зон, а также напряжения обратного смещения подложки МОПТ вышеуказанное определение порогового напряжения применяется в физико-топологической модели для дрейфового тока стока в режиме сильной инверсии проводимости канала МОПТ [2]. Однако в наноразмерном диапазоне толщин подзатворного диэлектрика (двуокись кремния), поверхностный потенциал достигается еще в подпороговой области напряжений на затворе [3]. Поэтому при наноразмерных толщинах подзатворного диэлектрика указанное определение порогового напряжения не удовлетворяет модели дрейфового тока стока в режиме сильной

инверсии проводимости канала и подпорогового диффузионного тока стока.

### Основная часть

Для поиска однозначного значения поверхностного потенциала, при котором достигается пороговое напряжение, удовлетворяющее модели дрейфового тока стока в наноразмерном диапазоне толщин подзатворного диэлектрика, выполнены исследования низкочастотных удельных дифференциальных  $C_{0d}(\Psi_s)$  и статических  $C_{0c}(\Psi_s)$  вольт-фарадных характеристик МОП структуры в режиме слабой и сильной инверсии проводимости поверхности монокристаллического кремния, а также производных от вольт-фарадных характеристик по поверхностному потенциалу  $\Psi_s$  и напряжению на затворе  $V_G$ .

$$C_{0d} = \frac{C_{ox}(t_{ox}) \cdot C_{sd}(p_{p0}, \Psi_s)}{C_{ox}(t_{ox}) + C_{sd}(p_{p0}, \Psi_s)} \quad (1)$$

$$C_{0c} = \frac{C_{ox}(t_{ox}) \cdot C_{sc}(p_{p0}, \Psi_s)}{C_{ox}(t_{ox}) + C_{sc}(p_{p0}, \Psi_s)} \quad (2)$$

$$C_{sd}(p_{p0}, \Psi_s) = \frac{\partial Q_s}{\partial \Psi_s} \quad (3)$$

$$C_{sc}(p_{p0}, \Psi_s) = \frac{Q_s}{\Psi_s} \quad (4)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{SiO_2} \cdot \epsilon_0}{t_{ox}} \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{\sqrt{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{Si} \cdot k \cdot T}{q \cdot L_D} \cdot F(\beta \Psi_s; \frac{n_{p0}}{p_{p0}}) \quad (6)$$

где:  $Q_s$ —полная поверхностная плотность зарядов[1];  $t_{ox}$ —толщина подзатворного диэлектрика;  $\epsilon_{Si}$ —диэлектрическая проницаемость Si;  $\epsilon_{SiO_2}$ —диэлектрическая проницаемость SiO<sub>2</sub>;  $\epsilon_0$ —диэлектрическая постоянная.

Значения полной поверхностной плотности зарядов и удельных дифференциальной и статической емкости полупроводника  $C_{sd}$  и  $C_{sc}$  вычислены по (3),(4) и (6) в режиме инверсионной проводимости поверхности кремния, при: температуре 300К; концентрациях акцепторной примеси в подложке Na ( $10^{13}$ – $10^{18}$ ) см<sup>-3</sup>; значениях поверхностного потенциала  $\Psi_s$  от 0,15 до 1,05 с шагом 0,2% от потенциала Ферми  $\phi_F$ .

Общие дифференциальные  $C_{0z}$  и статические  $C_{0c}$  удельные емкости определены по (1)–(6) при толщинах подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) от 2 нм до 1000 нм. Затем вычислены производные от общих дифференциальных и статических удельных емкостей полупроводника по поверхностному потенциалу  $\Psi_s$  и напряжению на затворе  $V_G$  МОП структуры. При максимальных значениях производных от удельной дифференциальной и статической емкостей по напряжению на затворе  $V_G$  определены постоянные напряжения на затворе  $V_{Gm3}$  и  $V_{Gm4}$ , а также соответствующие им поверхностные потенциалы  $\Psi_{s3}$  и  $\Psi_{s4}$ . При максимальных значениях производных по поверхностному потенциалу, указанных выше, определены значения поверхностных потенциалов  $\Psi_{sm1}$  и  $\Psi_{sm2}$ , а также соответствующие этим потенциалам постоянные напряжения на затворе  $V_{G1}$  и  $V_{G2}$ :

$$V_{G1} = V_{t1} = \Psi_{sm1} + \frac{Q_{s1}}{C_{0x}}$$

$$V_{G2} = V_{t2} = \Psi_{sm2} + \frac{Q_{s2}}{C_{0x}}$$

$$V_{Gm3} = V_{t3} = \Psi_{s3} + \frac{Q_{s3}}{C_{0x}}$$

$$V_{Gm4} = V_{t4} = \Psi_{s4} + \frac{Q_{s4}}{C_{0x}}$$

Для сравнения величин  $V_{t1}$ – $V_{t4}$  с  $V_{T2\varphi F}$  вычислены пороговые напряжения при достижении поверхностного потенциала  $\Psi_s = 2\varphi_F$ .

$$V_{T2\varphi F} = 2 \cdot \varphi_F + \frac{Q_s}{C_{0x}}$$

Зависимости  $V_{t1}$ – $V_{t4}$  и  $V_{T2\varphi F}$  от концентрации дырок в кремниевой подложке МОП структуры для толщин подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) (2 и 50) нм представлены на рис. 1–2. Зависимости  $V_{t1}$ – $V_{t4}$  и  $V_{T2\varphi F}$  от толщины подзатворного ди-

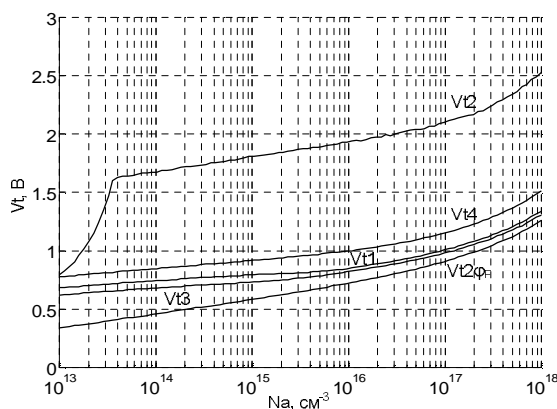


Рис. 1. Зависимость напряжений на затворе от концентрации примеси для толщины подзатворного диэлектрика 2 нм

электрика ( $\text{SiO}_2$ ) при концентрации дырок в подложке МОП структуры  $10^{13}$  и  $10^{15}$   $\text{см}^{-3}$  представлены на рис. 3 и 4.

Анализ зависимостей  $V_{t1}$ – $V_{t4}$  и сравнение их с зависимостью  $V_{T2\varphi F}$  показывает, что наиболее близкими значениями напряжений на затворе МОП структуры к соответствующим пороговым напряжениям  $V_{T2\varphi F}$  являются напряжения  $V_{t3}$ . При концентрациях дырок в подложке МОП структуры от  $10^{18}$   $\text{см}^{-3}$  и толщинах подзатворного диэлектрика более 2 нм до  $10^{14}$   $\text{см}^{-3}$  и толщинах подзатворного диэлектрика 1000 нм, как видно по графикам зависимостей рис. 2 и 4, значения  $V_{t3}$  с небольшим относительным отклонением совпадают со значениями  $V_{T2\varphi F}$ . В работе [3] показано, что с уменьшением толщины подзатворного диэлектрика возрастает разность между пороговым напряжением  $V_{T2\varphi F}$  и пороговым напряжением  $V_t$ , удовлетворяющим дрейфовую модель тока стока МОПТ. Такая разность возрастает и при уменьшении концентрации дырок в подложке МОП структуры.

Значения  $V_{t3}$  больше значений  $V_{T2\varphi F}$  и могут определять пороговые напряжения  $V_t$  для модели дрейфового тока стока, когда поверхностный потенциал  $2\varphi_F$  достигается в подпороговой области диффузионных токов стока МОПТ.

В таблице 1 представлены относительные отклонения значений  $V_{t3}$  от  $V_{T2\varphi F}$  в зависимости от концентрации дырок и толщины подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) МОП структуры, рассчитанные по соотношению:

$$\Delta = \frac{V_{t3} - V_{T2\varphi F}}{V_{t3}} \cdot 100\%$$

На рис. 5 представлена зависимость концентрации дырок в кремнии от толщины подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) МОП структуры, при которых напряжение на затворе  $V_{t3}$  равно напряжению  $V_{T2\varphi F}$ .

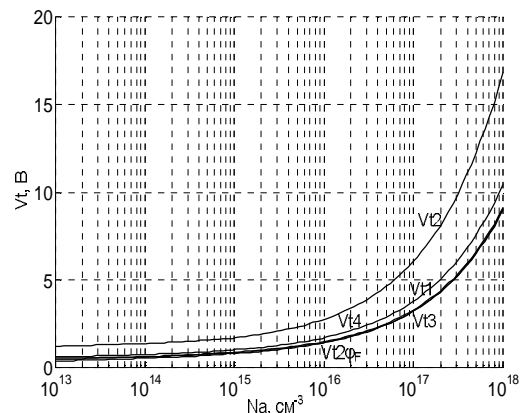


Рис. 2. Зависимость напряжений на затворе от концентрации примеси для толщины подзатворного диэлектрика 50 нм.

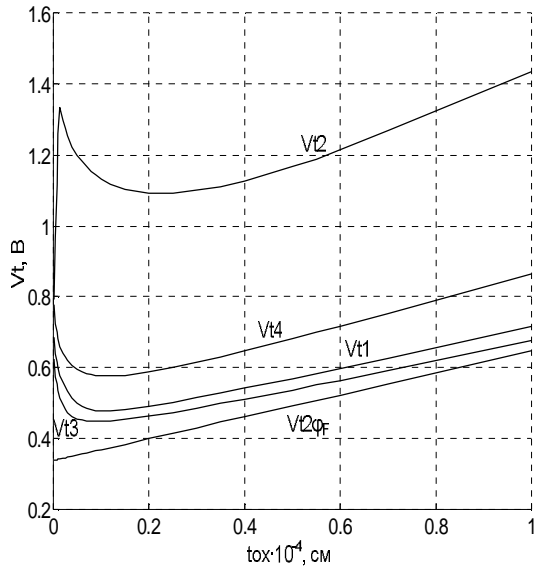


Рис. 3. Зависимость напряжений на затворе от толщины подзатворного диэлектрика для концентрации примеси  $10^{13} \text{ см}^{-3}$

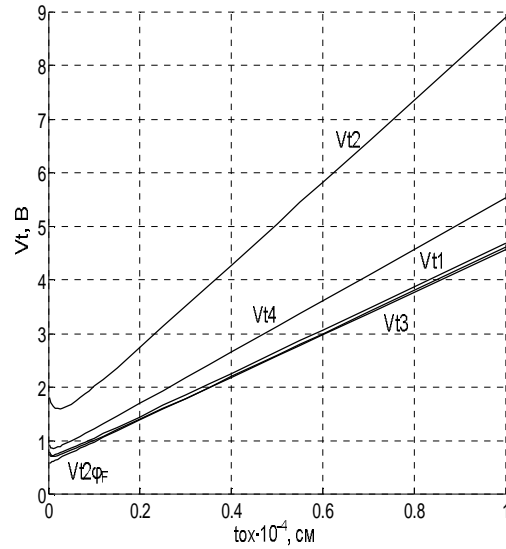


Рис. 4. Зависимость напряжений на затворе от толщины подзатворного диэлектрика для концентрации примеси  $10^{15} \text{ см}^{-3}$

Таблица 1.

$t_{ox}$ , нм	2	5	20	50	120	550	1000
Na, $\text{см}^{-3}$	$\Delta$ , %	$\Delta$ , %	$\Delta$ , %	$\Delta$ , %	$\Delta$ , %	$\Delta$ , %	$\Delta$ , %
$10^{13}$	45,6	41	30,6	22,4	16,7	7,8	4,4
$10^{14}$	32,6	26,3	16,5	12,1	7,9	1,7	0,1
$10^{15}$	20,1	14,8	9,4	5,9	2,75	-0,76	-1,3
$10^{16}$	11,9	9	4,4	1,7	-0,08	-1,4	-1,65
$10^{17}$	7,3	4,8	1,17	-0,34	-1	-1,5	-1,5
$10^{18}$	3,7	1,6	-0,43	-0,99	-1,2	-1,4	-1,4

На основании данных таблицы 1 и рис. 5 можно сделать выводы, что напряжения на затворе  $V_{t3}$ , при которых производная от удельной дифференциальной емкости МОП структуры по напряжению на затворе достигает максимума, в области справа от зависимости рис. 5, с отклонением не более 1,7%, совпадают с пороговым напряжением  $V_{T2ФF}$ , определенным, как напряжение на затворе, при котором поверхностный потенциал кремния достигает уровня  $2\phi_F$ . В этой области поверхностный потенциал  $\Psi_{s3}$  незначительно отличается от поверхностного потенциала  $2\phi_F$ . В области слева от зависимости рис.5, напряжение на затворе  $V_{t3}$  больше напряжения  $V_{T2ФF}$  и достигает отличия до 45,6 % при  $Na=10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $t_{ox}=2 \text{ нм}$ , при этом, так как  $\Psi_s > 2\phi_F$ , в этой области обеспечивается режим сильной инверсии проводимости канала.

На рис. 6 представлена зависимость  $V_{t3}=V_t$  от толщины подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) при различных концентрациях акцепторов Na в подложке МОП структуры. Из приведенной зависимости видно, что при концентрациях носителей заряда в подложке МОП структуры ниже  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  и толщинах подзатворного диэлектрика

меньше 6 нм с уменьшением  $t_{ox}$  напряжение  $V_{t3}$  возрастает. Это можно объяснить относительным снижением концентрации подвижного заряда в режиме сильной инверсии проводимости канала и существенным перераспределением напряжения на затворе между емкостью подзатворного диэлектрика и емкостью поверхностного заряда полупроводника.

Учитывая, что в МОПТ высокочастотная емкость “затвор”–“исток, подложка” вплоть до частоты 100 МГц соответствует низкочастотной емкости МОП структуры [4], результаты анализа низкочастотных зависимостей  $V_{t3}$  и  $V_{T2ФF}$  можно использовать для исследования порогового напряжения модели дрейфового тока стока МОПТ в режиме плавного с инверсной проводимостью канала. Если к затвору и к подложке МОПТ, в режиме инверсии проводимости канала, приложить сумму плавно или дискретно изменяющегося постоянного напряжения  $V_{G0}$  и малосигнального гармонического напряжения  $V_1=V_{1m}\sin\omega_1 t$  при напряжении на стоке  $V_{DS}=0$ , то плотность тока через емкость затвор-подложка на частотах  $\omega_1$  и  $2\omega_1$  можно представить в виде [5]:

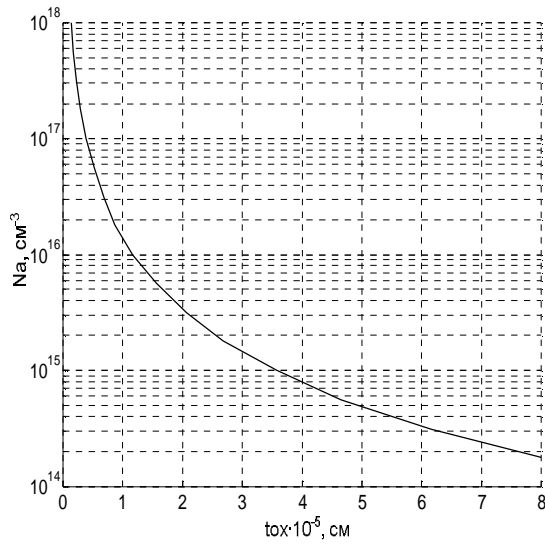


Рис. 5. Зависимость концентрации дырок в кремнии от толщины подзатворного диэлектрика, при которых напряжение на затворе  $V_{\text{з}}$  равно напряжению  $V_{T2\text{ФФ}}$ .

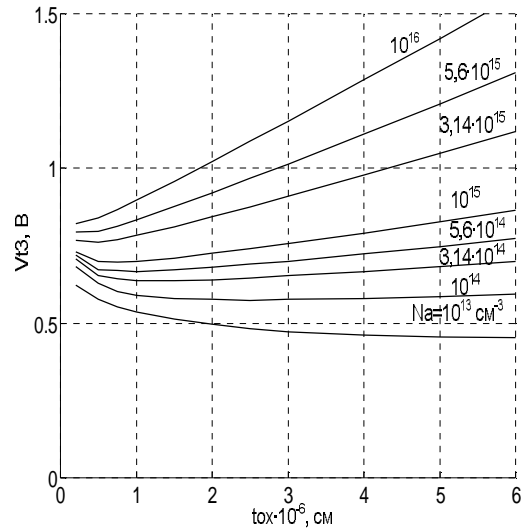


Рис. 6. Зависимость  $V_{\text{з}}$  от толщины подзатворного диэлектрика при различных концентрациях акцепторов в подложке МОП структуры

$$i(\omega_1) = \omega_1 C(V_{G0}) \cdot V_{1m} \cdot \cos \omega_1 t + \frac{3}{8} \omega_1 \left. \frac{d^2 C(V_G)}{dV_G^2} \right|_{V_{G0}} \cdot V_{1m}^3 \cdot \cos \omega_1 t + \dots \quad (7)$$

$$i(2\omega_1) = \omega_1 \cdot \left. \frac{dC(V_G)}{dV_G} \right|_{V_{G0}} \cdot \frac{V_{1m}^2}{2} \cdot \sin 2\omega_1 t + \dots$$

где  $C(V_{G0})$  удельная дифференциальная емкость затвор-подложка при постоянном напряжении  $V_{G0}$ . Если производная от удельной дифференциальной емкости затвор-подложка по напряжению на затворе достигает максимума, то вторая производная от удельной емкости затвор-подложка по напряжению на затворе равна нулю и тогда соответствующие частотам  $\omega_1$  и  $2\omega_1$  поверхностные плотности зарядов в канале МОПТ можно представить соотношениями:

$$Q(\omega_1) = C(V_{G0}) \cdot V_{1m} \cdot \sin \omega_1 t$$

$$Q(2\omega_1) = \left. \frac{dC(V_G)}{dV_G} \right|_{V_{G0}} \cdot \frac{V_{1m}^2}{4} \cos 2\omega_1 t$$

В режиме плавного канала МОПТ дрейфовый ток стока на частотах  $\omega_1$  и  $2\omega_1$  можно выразить соотношениями:

$$i_{DS}(\omega_1) = \frac{W}{L} \mu_0 C(V_{GS0}) V_{1m} V_{DS} \sin \omega_1 t$$

$$i_{DS}(2\omega_1) = \frac{W}{4L} \mu_0 \left. \frac{dC(V_{GS})}{dV_{GS}} \right|_{V_{GS0}} V_{DS} V_{1m}^2 \cos 2\omega_1 t$$

Их среднеквадратичные значения:

$$I_{DS}(\omega_1) = \frac{W}{L} \mu_0 C(V_{GS0}) V_{1c} V_{DS} \quad (8)$$

$$I_{DS}(2\omega_1) = \frac{\sqrt{2}W}{4L} \mu_0 \left. \frac{dC(V_{GS})}{dV_{GS}} \right|_{V_{GS0}} V_{1c}^2 V_{DS} \quad (9)$$

Для повышения точности выделения селективным вольтметром гармонических составляющих токов предпочтительнее измерять токи на разностной частоте ( $\omega_1 - \omega_2$ ). Аналогично можно представить выражения для среднеквадратичного значения тока на разностной частоте.

Если на затвор подать сумму плавно или дискретно изменяющегося постоянного напряжения  $V_{GS0}$  и двух малосигнальных разночастотных гармонических напряжений  $V_1 = V_{1m} \sin \omega_1 t$  и  $V_2 = V_{2m} \sin \omega_2 t$ , тогда среднеквадратичное значение тока на разностной частоте можно представить в виде соотношения:

$$I_{DS}(\omega_1 - \omega_2) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left. \frac{dC(V_{GS})}{dV_{GS}} \right|_{V_{GS0}} V_{1c} V_{2c} \frac{W}{L} \mu_0 V_{DS} \quad (10)$$

Учитывая, что дрейфовый ток стока  $I_{DS}(2\omega_1)$  на удвоенной частоте и на разностной частоте  $I_{DS}(\omega_1 - \omega_2)$  прямопропорционален производной от дифференциальной емкости "затвор-подложка, исток" по напряжению на затворе,

были выполнены экспериментальные исследования напряжений на затворе  $V_{GSm}$ , при которых токи  $I_{DS}(2\omega_1)$  и  $I_{DS}(\omega_1-\omega_2)$  достигают максимальных значений в зависимости от величины напряжений на стоке  $V_{DS}$ . На рис. 7 и 8 показаны зависимости  $V_{GSm}$  от  $V_{DS}$ , измеренные в длинноканальном р-МОП транзисторе с  $t_{ox}=150$  нм и  $W/L=500$ .

На графиках зависимостей рис. 7 и 8 видны три различных характерных интервала напряжений на стоке. Первый интервал (см. рис. 8) при напряжениях  $V_{DS}$  от 0,01 до 0,07 В, на котором токи разностной частоты достигают максимума, при постоянном напряжении на затворе  $V_{GSm}=2,945$  В. В этом интервале максимальное значение тока стока на разностной частоте  $I_{DS}(\omega_1-\omega_2)$ , график зависимости от  $V_{DS}$  которого изображен на рис. 9, линейно растет с увеличением напряжения на стоке  $V_{DS}$  и соответствует зависимости (10).

Во втором интервале  $0,07 \text{ В} < V_{DS} < 2 \text{ В}$  напряжение на затворе  $V_{GSm}$ , при котором достигается максимальное значение тока стока  $I_{DS}(\omega_1-\omega_2)$ , возрастает от 2,945 В до 3,5 В. В этом интервале напряжений на стоке  $V_{DS}$  ток стока на разностной частоте  $I_{DS}(\omega_1-\omega_2)$  нелинейно возрастает от 1,3 мкА до 8 мкА, как видно из графика на рис. 10. Увеличение напряжения  $V_{GSm}$  от 2,945 В до 3,5 В можно объяснить изменением порогового напряжения при росте тока стока [6], а также переходом от режима плавного, с инверсной проводимостью, канала до режима отсечки проводимости канала МОПТ.

В третьем интервале напряжений на стоке  $2 \text{ В} < V_{DS} < 9 \text{ В}$  напряжение на затворе  $V_{GSm}$

достигает насыщения и не изменяется с изменением напряжения на стоке. Ток стока на разностной частоте  $I_{DS}(\omega_1-\omega_2)$  стремится к насыщению до уровня 10 мкА. Эти особенности можно наблюдать на графиках зависимостей рис. 7 и 10.

В МОПТ с толщиной подзатворного диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) от 35 нм до 150 нм и концентрацией акцепторной примеси в подложке  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  пороговые напряжения  $V_T$ , определенные методом линейной экстраполяции зависимости тока стока до пересечения с осью напряжений на затворе и напряжения  $V_{GSm}$ , измеренные при достижении максимальных значений токов стока на разностной частоте, представлены в таблице 2. Пороговые напряжения  $V_T$  и напряжения  $V_{GSm}$  определяли при напряжении на стоке  $V_{DS}=0,04$  В. Также необходимо отметить, что температурные изменения пороговых напряжений  $V_T$  и напряжений  $V_{GSm}$  в диапазоне  $(-10 \div 100)^\circ\text{C}$  составляли  $(0,0019 \div 0,002)$ В.

Согласно данным таблицы 2 отличие пороговых напряжений  $V_T$  и напряжений  $V_{GSm}$  составляют не более 2%. Также при этом значения температурных коэффициентов изменения  $V_T$  и  $V_{GSm}$  совпадали.

Таким образом, на основании экспериментальных данных можно определять пороговое напряжение МОПТ, в режиме с инверсной проводимостью канала, как напряжение на затворе и соответствующий ему поверхностный потенциал  $\Psi_s$ , при котором производная от дифференциальной емкости “затвор”-“подложка, исток” по напряжению на затворе достигает максимума.

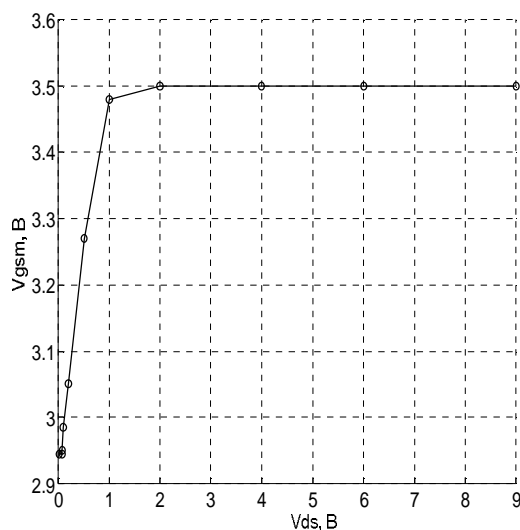


Рис. 7. Зависимость постоянных напряжений на затворе от напряжений на стоке, при которых ток стока на разностной частоте достигает максимума

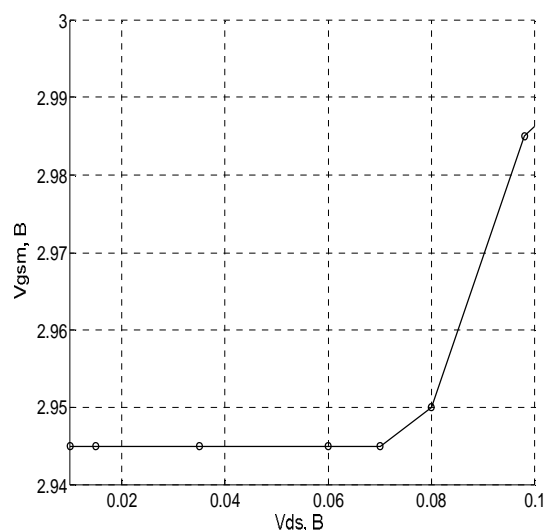


Рис. 8. Зависимость постоянного напряжения на затворе от напряжения на стоке, при которых ток стока на разностной частоте достигает максимума ( $V_{DS} \leq 0,1$  В)

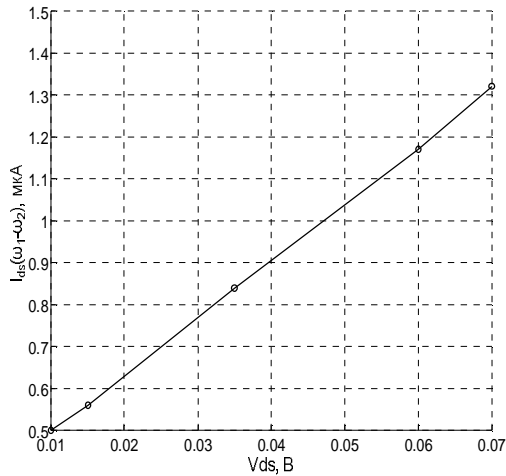


Рис. 9. Зависимость тока стока на разностной частоте от напряжения на стоке ( $V_{DS} \leq 0,07$  В)

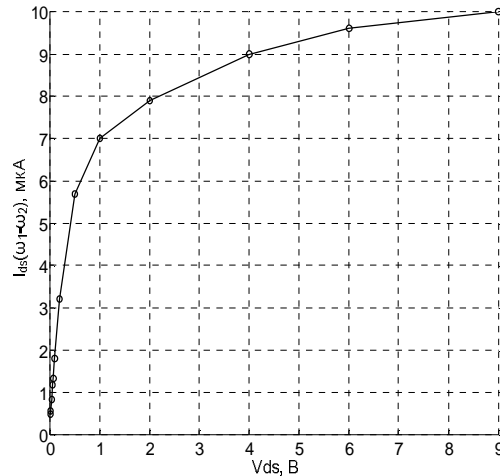


Рис. 10. Зависимость тока стока на разностной частоте от напряжения на стоке

Таблица 2.

$t_{ox}$ , нм	35	41	52	61	105	150
$V_T$ , В	0,98	1,01	1,1	1,15	1,4	2,95
$V_{GSm}$ , В	0,97	1,03	1,09	1,17	1,42	2,945

## Выводы

В результате выполненных экспериментальных и расчетных исследований установлено, что:

1) для модели дрейфового тока стока в МОПТ, с наноразмерными толщинами подзатворного диэлектрика, расчетное значение порогового напряжения  $V_T$  можно определить как напряжение на затворе МОП структуры и соответствующий этому напряжению поверхностный потенциал  $\Psi_s$ , при котором производная от дифференциальной емкости “затвор”-“подложка” по напряжению на затворе достигает максимального значения;

2) в определенном диапазоне наноразмерных толщин подзатворного диэлектрика и концентраций основных носителей заряда в подложке МОПТ пороговое напряжение может увеличиваться при уменьшении толщины подзатворного диэлектрика;

3) существует область концентраций свободных основных носителей заряда в подложке и толщин подзатворного диэлектрика МОП структуры, в которой пороговое напряжение, определенное как напряжение на затворе, при котором достигается поверхностный потенциал  $2\phi_F$  практически совпадает с поверхностным потенциалом  $\Psi_s$ , при котором достигается максимальное значение производной от дифференциальной емкости МОП структуры по напряжению на затворе.

Предложен способ экспериментального определения порогового напряжения МОПТ путем измерения постоянного напряжения  $V_{GSm}$  между затвором и подложкой, соединенной с истоком, при котором достигается максимальное значение дрейфового тока стока  $I_{DS}(2\omega_1)$  на частоте  $2\omega_1$  или тока стока  $I_{DS}(\omega_1-\omega_2)$  на разностной частоте  $(\omega_1-\omega_2)$ , при условии подачи на сток постоянного напряжения, обеспечивающего режим плавного канала, а между затвором и подложкой, соединенной с истоком суммы постоянного  $V_{GS0}$  и одного или двух малосигнальных разночастотных гармонических напряжений.

## Литература

1. Брусенцов И.В. Современные методы моделирования порогового напряжения полевых МОП транзисторов // Зарубежная электронная техника.—1990. №10.—С. 6–20.
2. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов.—М.: Мир, 1984.—Т. 2.—456 с.
3. В.А. Гуртов. Полевые транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник. —Петрозаводск.: ПГИ, 1981.—90 с.
4. Р. Кобболд. Теория и применение полевых транзисторов.—Л.: Энергия, 1975.—304 с.
5. Л.С. Берман. Емкостные методы исследования полупроводников.—Л.: Наука, 1972.—104 с.
6. Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гриниг. Электроника ультрабольших интегральных схем.—М.: Мир, 1991.—328 с.