

Свойства подзатворных стеков HfO₂/SrOА.В. Молчанова^{1,2}, Ф.А. Сидоров^{1,2}, А.Е. Рогожин^{1,2}¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²Физико-технологический институт РАН

На протяжении более четырех десятилетий термический оксид кремния SiO₂ был основным диэлектриком в кремниевых интегральных схемах. Однако при толщине слоя SiO₂ менее 1,4 нм туннельный ток утечки через затворную структуру достигает недопустимо высоких значений (более 10 А/см²) [1]. Возможным решением этой проблемы является замена диоксида кремния SiO₂ на материал с высокой диэлектрической проницаемостью. В настоящее время широко используемым материалом в качестве подзатворного диэлектрика является оксид гафния HfO₂ с диэлектрической проницаемостью равной 20-25. Использование оксида гафния и диэлектриков на его основе связано с некоторыми трудностями, в частности, ухудшением параметров МДП-прибора из-за наличия электрически активных дефектов и промежуточного слоя на границе диэлектрик/кремний [2]. Промежуточный слой на границе диэлектрика с кремнием имеет состав SiO_x или Hf_{1-x}Si_xO_y и часто характеризуется диэлектрической проницаемостью ниже основного диэлектрического слоя HfO₂. В первом поколении МДП-структур с диэлектриком на основе оксида гафния эквивалентная толщина оксида составила приблизительно 1 нм. Такая толщина сопоставима с толщиной промежуточного слоя с низкой диэлектрической проницаемостью. Таким образом, промежуточный слой является ограничением на пути дальнейшего масштабирования МДП-приборов. Одним из путей решения данной проблемы является использование эпитаксиального слоя SrO (диэлектрическая проницаемость 13,3), заменяющего промежуточный слой на границе HfO₂/Si [3]. Важным свойством оксида стронция SrO является пассивирование поверхности кремния, предотвращающее окисление нижележащего кремния или формирования силицида Hf_xSi_y в процессе последующего осаждения оксида гафния HfO₂ при низком давлении кислорода [4,5].

Целью данной работы является исследование электрофизических свойств двухслойных диэлектрических стеков HfO₂/SrO, сформированных методом электронно-лучевого испарения. Диэлектрические слои формировались на пластинах Si(100), предварительно обработанных в растворах RCA с последующим травлением естественного окисла в растворе HF. Слой оксида стронция SrO толщиной ~0,5 нм формировался методом электронно-лучевого испарения при температуре подложки 400°C в атмосфере кислорода. В том же технологическом цикле слой оксида гафния HfO₂ толщиной ~10 нм формировался при температуре подложки 300°C. Нанесение металлических слоев производилось магнетронным распылением вольфрама. Для формирования контактных площадок применялся стандартный фотолитографический процесс с последующим травлением в 5%-ом растворе перекиси водорода. Биметаллический обратный контакт состава Ti/Ni формировался методом электронно-лучевого испарения на пластине, предварительно обработанной в ионном пучке Ar⁺.

Исследование структур W/HfO₂/SrO/Si(100) производилось методом вольтфарадных характеристик на частотах 1 МГц, 100 кГц, 10 кГц (рис. 1). Из полученных зависимостей была оценена величина результирующей диэлектрической проницаемости двухслойного стека HfO₂/SrO, которая составила примерно 11. Эта величина оказалась ниже диэлектрической проницаемости HfO₂ (20-25). Эквивалентная толщина исследуемого диэлектрического стека HfO₂/SrO составила 3,25 нм.

Известно, что для слоев оксида гафния HfO₂ характерно наличие кислородных вакансий. Такие дефекты приводят к смещению и нестабильности порогового напряжения МДП-прибора. С целью уменьшения кислородных вакансий в объеме диэлектрика слои HfO₂ формировались в атмосфере кислорода. Оценка величины концентрации подвижных ионов в толщине слоя HfO₂ производилась по величине гистерезиса на CV-кривой. Концентрация подвижных ионов N_m была рассчитана по формуле:

$$N_m = -\frac{C_{ox} \Delta U}{q S d_{ox}} \quad (1)$$

здесь C_{ox} емкость оксида, ΔU величина гистерезиса, S площадь контактной площадки, d_{ox} толщина оксида.

Концентрация подвижного заряда в структурах с двойным диэлектриком HfO_2/SrO составила $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Поверхностные ловушки на границе диэлектрик/кремний были оценены двумя методами: одночастотным методом проводимости и высокочастотным CV-методом. Распределения плотности ловушек в запрещенной зоне кремния представлены на рис.2. Плотность поверхностных состояний, рассчитанная по одночастотному методу, составила $1,47 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Средняя величина плотности поверхностных состояний, рассчитанная по высокочастотному CV методу, оказалась примерно равной $7,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$.

Расчет плотности поверхностных состояний N_{ss} по одночастотному методу производился по формуле:

$$N_{ss} = \frac{2}{eA} \frac{G_{m,max} / \omega}{\left(\frac{G_{m,max}}{\omega C_{ox}} \right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_{ox}} \right)^2} \quad (2)$$

здесь e заряд электрона, A площадь контактной площадки, $G_{m,max}$ измеренная проводимость структуры в точке максимума, ω частота, на которой производилось измерение, C_{ox} емкость диэлектрического слоя, C_m измеренная емкость структуры в точке, соответствующей максимуму проводимости.

Расчет плотности поверхностных состояний высокочастотным CV-методом производился посредством вычисления зависимости поверхностных состояний C_{it} от поверхностного потенциала ψ_s :

$$C_{it}(\psi_s) = C_{ox} \left[\left(\frac{d\psi_s}{dV_G} \right)^{-1} - 1 \right] - C_s(\psi_s) \quad (3)$$

здесь C_{ox} емкость диэлектрического слоя, V_G подаваемое напряжение, $C_s(\psi_s)$ зависимость емкости кремния от поверхностного потенциала.

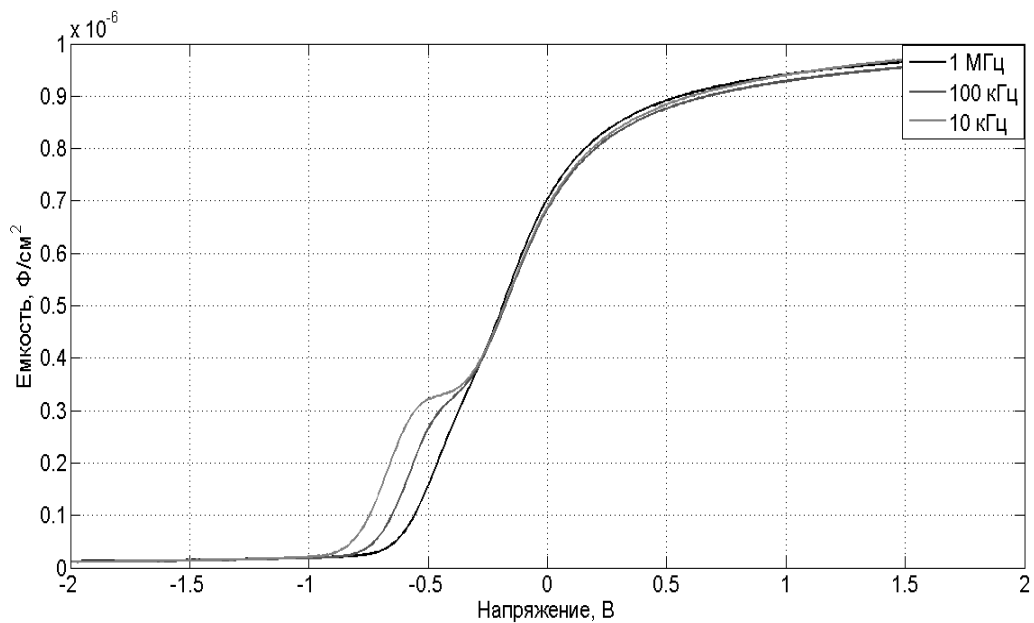


Рис.1. Вольтфарадные характеристики структуры $W/HfO_2/SrO/Si(100)$ при разных частотах.

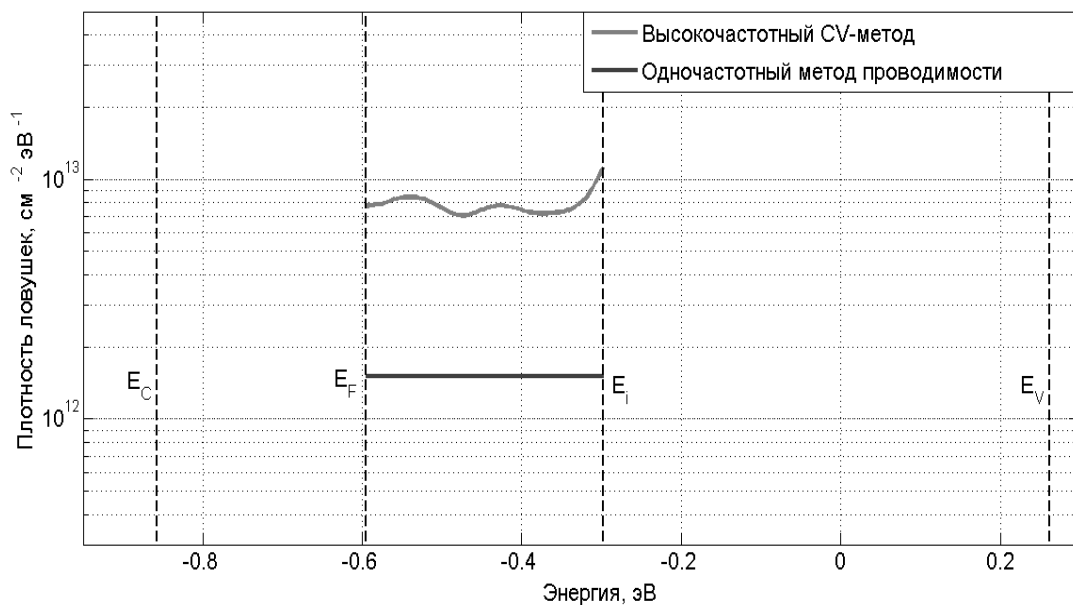


Рис.2. Распределения плотности ловушек в запрещенной зоне кремния, рассчитанные двумя методами на частоте 100кГц.

Литература

1. *Lo S.-H., Buchanan D. A., Taur Y.* Quantum-Mechanical modeling of electron tunneling current from the inversion layer of ultra-thin-oxide nMOSFET's // IEEE electron device letters. – 1997. – V. 18, N. 5. – P. 209-211.
2. *Robertson J.* High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors // Rep. Prog. Phys. – 2006 – V. 69, N. 2. – P. 327-396.
3. *Ando T.* Ultimate scaling of high-k gate dielectrics: higher-k or interfacial layer scavenging? // Materials. – 2012. – V. 5, N. 3. – P. 478-500.
4. *Marchiori C., Frank M.M., Bruley J., Narayanan V.* Epitaxial SrO interfacial layers for HfO₂-Si gate stack scaling // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 98. – P. 052908:1-052908:3.
5. *Frank M.M., Marchiori C., Bruley J., Fompeyrine J.* Epitaxial strontium oxide layers on silicon for gate-first and gate-last TiN/HfO₂ gate stack scaling // Microelectron. Eng. – 2011 – V. 88. – P. 1312-1316.