

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСНОВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

© 2016 г. Е.Н. ЕПИХИН

Научно-исследовательский институт системных исследований, г. Москва
e-mail: grm2019@mail.ru

В настоящее время формируется новое научное направление – высокотемпературная электроника, которая включает задачи применения электронных приборов в приложениях, где условия их эксплуатации отличаются от нормальных. В данном контексте рассматриваются различные технологии, одной из которых является тонкопленочная технология «кремний на изоляторе» (КНИ). Микросхемы, изготовленные по КНИ технологии, в полной мере являются идеальными высокотемпературными устройствами. Они находят широкое применение в вооруженных силах, нефтегазовой, ядерной и других отраслях, то есть там, где необходимо их функционирование в высокотемпературной среде.

К перспективным представителям элементной базы КНИ микросхем по праву относят двух затворные полевые транзисторы [1, 2]. Данная архитектура характеризуется уникальными возможностями для масштабирования параметров в наноразмерной области. Для нанoeлектронных устройств проведение макетных исследований в высоко температурной области становится не постижимо дорогостоящей задачей [3]. С целью сокращения расходов разрабатываются методы схемотехнического моделирования, с помощью которых получают прогноз, сообразуясь с которым и разрабатывают микросхемы. В связи с этим важно оценить влияние температурной зависимости диэлектрических свойств кремния – одного из главных компонентов КНИ структуры - на ключевые характеристики транзистора. При этом, несмотря на большое количество экспериментальных работ в литературе практически нет соответствующих данных по оценке воздействия изменения диэлектрической проницаемости, например, на уровень тока транзистора [2, 3].

В табл. 1 ниже приведены экспериментальные данные (первая и вторая колонки), заимствованные из [4] по диэлектрической проницаемости кремния для разных температур, где T – температура, $\epsilon_{S_{\{exp,cor\}}}$ - диэлектрическая проницаемость кремния: экспериментальные и скорректированные значения, соответственно, $E_g(T)$ - ширина запрещенной зоны. При этом во всей температурной области пределы точности эксперимента совпадают.

Таблица 1

Экспериментальные и вычисленные значения
диэлектрической проницаемости кремния

T, K	$\epsilon_{S_{exp}}$	$E_g(T)$	$\epsilon_{S_{exp}}(T)^2 E_g(T)$	$\epsilon_{S_{cor}}$
200	11.5	1.15	151.7	11.52
296	11.6	1.23	151.2	11.63
373	11.8	1.11	153.8	11.74
473	11.9	1.08	152.2	11.90

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости кремния $\epsilon_s(T)$ хорошо описывается известным соотношением Мосса:

$$\epsilon_s(T)^2 E_g(T) = \text{const} \quad (1)$$

Исходя из данных табл. 1 для температур от 200 К вычислялось произведение $\epsilon_{s_{\text{exp}}}(T)^2 E_g(T)$ с учетом температурной зависимости ширины запрещенной зоны (третья колонка). Усредненное значение полученных произведений составляет 152.2 эВ. Отклонение усредненной величины от значения величины $\epsilon_{s_{\text{exp}}}(T)^2 E_g(T)$ для отдельной температуры не превышает 2 эВ. Используя усредненное значение, корректировались значения диэлектрической проницаемости (пятая колонка). При этом максимальное отклонение составляет 0.06, что в процентах равно 0.5%. Все проведенные расчеты иллюстрируются табл. 1 и рис. 1.

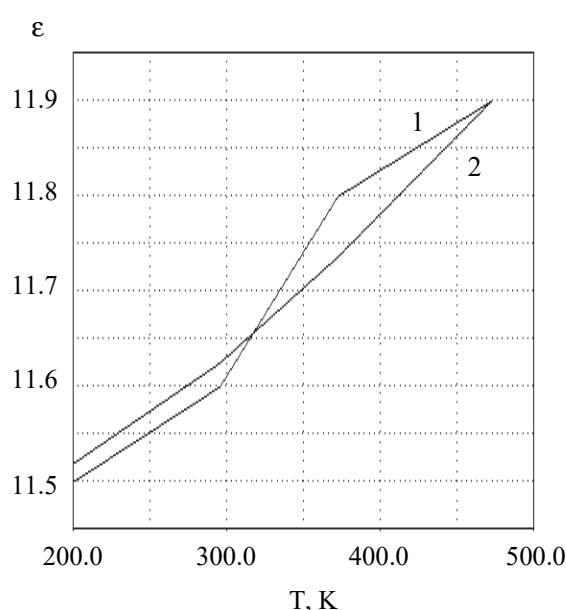


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости кремния, где 1 - экспериментальные точки, соединенные прямыми линиями, 2 - кривая по закону (1).

Отличительной чертой развития микроэлектроники на современном этапе является не только неуклонное снижение топологических норм, но и применение новых материалов в транзисторных структурах. В последние годы во всем мире возникла новая задача - использовать монокристаллы германия как основной материал для создания высокоэффективных микросхем [2], так как германию, как известно, присуща намного более высокая подвижность электронов и дырок по сравнению с кремнием.

Для транзисторных структур «германий на изоляторе» учет температурной зависимости диэлектрической проницаемости германия (см. рис. 2) приводит к другим результатам: закон Мосса выполняется только в низкотемпературной области до 300 К.

В высокотемпературной области (для температур выше 300 К) наблюдается резкое снижение диэлектрической проницаемости. Так, например, при $T=500$ К ее аппроксимированное значение составляет 13.4 или на более чем 16% меньше от максимального значения.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости германия будет нивелировать термическую деградацию ключевых характеристик транзистора: порогового напряжения, тока насыщения, подпорогового тока, крутизны подпороговой харак-

теристики [5]. Все перечисленные параметры зависят от распределения потенциала в рабочей области транзистора. Уровень данного потенциала напрямую зависит от значения диэлектрической проницаемости, что следует из уравнения Пуассона. И в отличие, от кремния, где учет его температурной зависимости диэлектрической проницаемости приводит к эффектам второго порядка, для германия, напротив, необходимо учитывать рассмотренную характеристику, как при моделировании, так и при разработке электронных устройств.

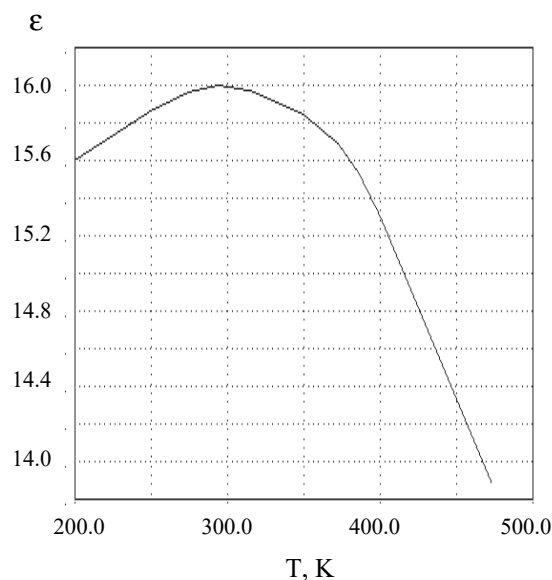


Рис. 2. Экспериментальная температурная зависимость диэлектрической проницаемости германия.

В заключении отметим, что анализ влияние температурной зависимости диэлектрической проницаемости кремния и германия на основные электро-физические характеристики наноразмерных транзисторных структур позволяет сформулировать следующие выводы. При моделировании электро-физических характеристик транзисторных структур в диапазоне высоких температур (выше 350 К) следует учитывать температурную зависимость диэлектрической проницаемости германия, аналогичной зависимостью для кремния можно пренебречь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kranti A, Armstrong G. A.*, Engineering source/drain extension regions in nanoscale double gate (DG) SOI MOSFETs: Analytical model and design considerations // *Solid State Electronics*.-2006, v. 50, №2, p. 437 - 447.
2. *Масальский Н.В.* Характеристики двух затворных КНИ КМОП нанотранзисторов для перспективных технологий с низким уровнем потребляемой мощности // *Микроэлектроника*. -2012, т. 41, №6, с. 436-444.
3. *Goel A. K., Tan T. H.* High temperature and self-heating effects in fully depleted SOI MOSFETs // *Microelectronics Journal*.- 2006, v. 37, № 4, p. 963-971.
4. *Коршунов Б.П., В.П. Калинушкин В.П., Козлов Г.В., Сиротинский О.И.* Диэлектрические свойства кремния, германия и арсенида галлия в диапазоне субмиллиметровых волн // *ФТТ*. -1989, т. 31, №1, с.101-105.
5. *Масальский Н.В.* Моделирование температурного распределение потенциала в КНИ КМОП нанотранзисторе с архитектурой без перекрытия // *Наноструктуры и наноматериалы-XXI век*. -2014, № 4, с. 9-13.