

Исследование процессов генерации и эволюции центров захвата носителей в диэлектрических плёнках МДП-структур
77-30569/251437

11, ноябрь 2011

авторы: Андреев Д. В., Столяров А. А., Романов А. В.

УДК 621.382

МГТУ им. Н.Э. Баумана
DAndreev-EIC@yandex.ru
alalstol@mail.ru
romanov@okbmel.ru

Перспективным методом модификации электрофизических характеристик полупроводниковых приборов с МДП-структурой является инжекция заряда в многослойный диэлектрик, позволяющая проводить индивидуальную коррекцию параметров каждого прибора [1-2]. Для модификации параметров МДП-приборов можно использовать заряд, захватываемый на ловушки в объеме окисла в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик и радиационных воздействиях [1-4]. Сильнополевые и радиационные воздействия могут оказывать существенное влияние на формирование и эволюцию центров захвата носителей в подзатворном диэлектрике и на границе раздела полупроводник-диэлектрик и использоваться для улучшения характеристик приборов. В настоящее время процессы инжекционной модификации и деградации МДП-структур с термической плёнкой SiO₂ не нашли своего окончательного объяснения, что связано, прежде всего, с противоречиями между публикуемыми экспериментальными данными, а также с отсутствием аналитических моделей описывающих эти явления в широком диапазоне воздействий и учитывающих технологические особенности изготовления диэлектрических пленок.

В данной работе разработана модель, описывающая процессы образования и эволюции центров захвата носителей в инжекционно модифицированных многослойных наноразмерных диэлектрических слоях МДП-структур в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик постоянным током.

В разработанной модели учитывается, что при протекании постоянного инжекционного тока через плёнку двуокиси кремния МДП-структуры помимо сильнополевой генерации положительного заряда и захвата электронов на исходные ловушки происходит генерация электронных ловушек (даже при не очень сильных электрических полях) с постоянным коэффициентом генерации, а также наблюдается возрастание плотности поверхностных состояний. При анализе экспериментальных данных и моделировании полагалось, что процесс генерации электронных ловушек в пленке двуокиси кремния равномерен по всему объему. Выполнено уточнение модели изменения зарядового состояния МДП-структур [5-8] путём рассмотрения новых физических процессов, а также учёта изменения локальных электрических полей в объеме диэлектрика, обусловленных накоплением зарядов, в режиме протекания постоянного туннельного тока.

В разработанной модели принимаем, что сильнополевая инжекция электронов через диэлектрик подчиняется уравнению Фаулера-Нордгейма. Для учёта накопления

положительного заряда, формирующегося вследствие ударной ионизации, была применена модель, предложенная в [5], которая учитывает рекомбинацию захваченных дырок с инжектированными электронами.

При легировании пленки SiO₂ фосфором формируется двухслойный диэлектрик SiO₂-ФСС (фосфорно-силикатное стекло). Отличительной особенностью МДП-структур с диэлектрической пленкой SiO₂-ФСС при протекании сильнополевого инжекционного тока является захват части электронов на ловушки в слое ФСС [1,2], именно этот заряд используется для коррекции пороговых напряжений МДП-приборов и его учету в модели уделено особое внимание.

Моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO₂, легированной фосфором, а также МДП-структур с поликремниевым затвором (Si*) при сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов предлагается проводить на основе ранее предложенной системы уравнений [5-7], проведя её уточнение путём добавления выражения, описывающего генерацию электронных ловушек в диэлектрике [8], введением уравнения нейтральности заряда и уравнения для описания кинетики накопления заряда на поверхностных состояниях. Тогда уточненная система уравнений будет иметь вид:

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния в режиме протекания постоянного инжекционного тока

$$\Delta V_I(+)=\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[n_{pg}(d_{ox}-x_{pg})+n_t(d_{ox}-x_n)-p(d_{ox}-x_p)\right], \quad (1)$$

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из металлического электрода

$$\Delta V_I(-)=\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[n_{pg}x_{pg}+n_tx_n\right], \quad (2)$$

- уравнение для плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO₂

$$q\frac{dp}{dt}=J_n\cdot P_{mf}\cdot\left[\frac{E}{E_{th}^{ii}}-1\right]^4\cdot\sigma_p\cdot(N_p-p)-J_n\cdot\sigma_n\cdot p, \quad (3)$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма

$$J_n=AE^2\exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (4)$$

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в слое ФСС

$$n_{pg}=\sum_{i=1}^3N_{pgi}\cdot\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_{pgi}}{q}Q_{inj}\right)\right], \quad (5)$$

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO₂

$$n_{t0}=N_{t0}\cdot\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_{t0}}{q}Q_{inj}\right)\right], \quad (6)$$

- уравнение для плотности электронов, захваченных на сгенерированные при сильнополевом воздействии ловушки

$$n_t=\frac{g}{q}\cdot Q_{inj}-\frac{g}{\sigma_g}\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_g\cdot Q_{inj}}{q}\right)\right], \quad (7)$$

- уравнение нейтральности заряда

$$Q_0 = Q_c + Q_{inj}, \quad (8)$$

- уравнение для заряда, захваченного на поверхностных состояниях:

$$\frac{dn_{it}^{e-h}}{dt} = \gamma_{e-h} \frac{J_n}{q} \sigma_n P(E, t), \quad (9)$$

где q – заряд электрона; $\epsilon\epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; n_{pg} и n_{t0} – плотности электронов, накапливаемых в ФСС и SiO₂ соответственно; n_t – плотность электронов, захваченных на сгенерированные ловушки; p – плотность дырок, накапливаемых в SiO₂; d_{ox} – толщина подзатворного диэлектрика; x_{pg} , x_n , и x_p – положения центроидов (относительно границы Si- SiO₂) отрицательного заряда в ФСС, отрицательного заряда в SiO₂ и положительного заряда в SiO₂ соответственно; N_{pgi} и σ_{pgi} – плотности и сечения захвата i -х электронных ловушек в пленке ФСС; N_{t0} и σ_{t0} – плотность и сечение захвата электронных ловушек в пленке SiO₂; t – время; Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик; P_{mf} –

коэффициент, зависящий от толщины окисла; E_{th}^{ii} – пороговое поле ударной ионизации (МВ/см); g – коэффициент генерации электронных ловушек; σ_g – сечение захвата сгенерированных электронных ловушек; N_p и σ_p – плотность и сечение захвата дырочных ловушек в SiO₂; σ_n – сечение захвата инжектированных электронов заполненными дырочными ловушками;

$A=1,54 \cdot 10^{-6} \cdot m_0/m^* \cdot \phi_B^{-1}$ [А/В²] и $B=6,83 \cdot 10^7 \cdot m_0/m^* \cdot \phi_B^{3/2}$ [В/см] – постоянные туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции; m_0 и m^* – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике; ϕ_B – высота потенциального барьера на инжектирующей границе

раздела; E – напряжённость катодного электрического поля; γ_{e-h} – вероятность создания поверхностного состояния электронно-дырочной рекомбинацией. Система (1-9) решалась при начальных условиях: $n_{pg}(0) = n_{t0}(0) = n_t(0) = p(0) = 0$.

Параметры модели, входящие в выражения (1-9), при моделировании изменения зарядового состояния МДП-структуры Si-SiO₂-ФСС-Al, полагались равными: $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-14}$ см²; $b_0 = 3 \cdot 10^{-13}$ МВ³/см; $N_p = 5 \cdot 10^{11}$ см⁻²; $\sigma_{t0} = 1 \cdot 10^{-18}$ см²; $N_{t0} = 1,5 \cdot 10^{13}$ см⁻²; $\sigma_{pg1} = 1,4 \cdot 10^{-13}$ см²; $\sigma_{pg2} = 3,2 \cdot 10^{-16}$ см²; $N_{pg1} = 4 \cdot 10^{12}$ см⁻²; $N_{pg2} = 5 \cdot 10^{12}$ см⁻²; $g = 3 \cdot 10^{-7}$; $\sigma_g = 4 \cdot 10^{-20}$ см²; $\gamma_{e-h} = 0,3$.

Для МДП-структуры Si-SiO₂-Si*: $N_{t0} = 1,3 \cdot 10^{12}$ см⁻², $\sigma_{t0} = 5,3 \cdot 10^{-18}$ см²; $N_p = 1,5 \cdot 10^{12}$ см⁻², $\sigma_p = 8 \cdot 10^{-13}$ см²; $g = 3,5 \cdot 10^{-6}$.

Уравнение (5) записано в общем случае для инжекции электронов, как из кремния, так и из алюминия (Si-SiO₂-ФСС-Al). При инжекции электронов из кремния в уравнении будет два слагаемых, т.е. два типа электронных ловушек.

На рис.1 показаны энергетические зонные диаграммы, иллюстрирующие накопление зарядов и распределение локальных электрических полей в структуре Si-SiO₂-ФСС-Al (а) и Si-SiO₂-Si* (б) при инжекции электронов из кремния. Особенностью рассматриваемой модели является представление локальных электрических полей в диэлектрике для учёта накопления положительного заряда в плёнке двуокиси кремния. В соответствии с накапливаемыми зарядами, весь объем диэлектрика структуры Si-SiO₂-ФСС-Al (Si-SiO₂-Si*) разбивался на четыре (три) участка.

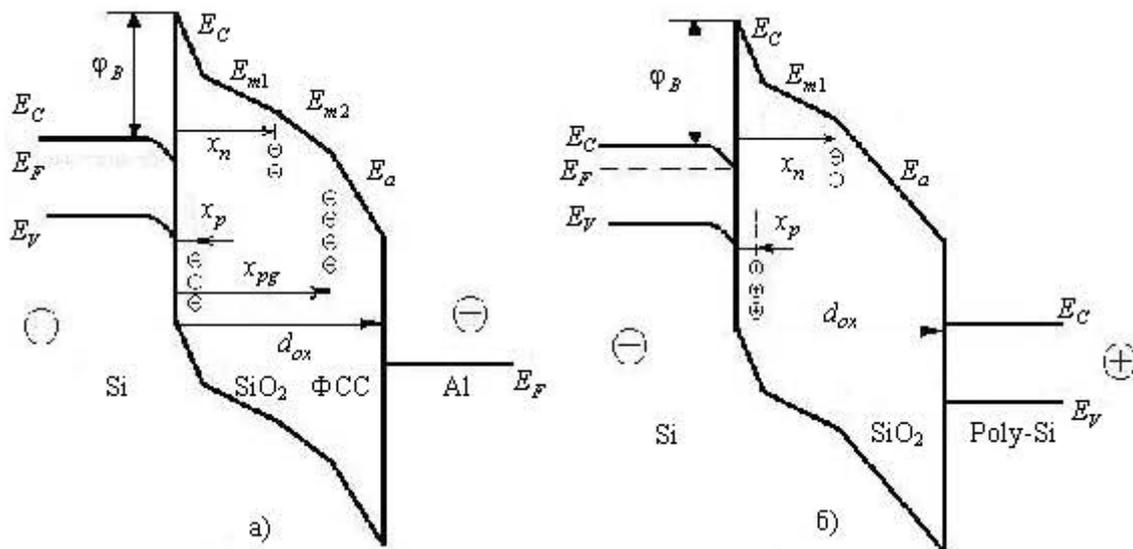


Рис.1. Энергетические зонные диаграммы, иллюстрирующие накопление зарядов и распределение локальных электрических полей в структуре Si-SiO₂-ФСС-Al (a) и Si-SiO₂-Si* (б) при инжекции электронов из кремния

Для МДП-структуры Si-SiO₂-ФСС-Al на трёх участках вводилось свое локальное электрическое поле (среднее первое E_{m1} , среднее второе E_{m2} , анодное E_a), четвёртый участок – катодное поле E_c (см. рис.1). Для полей E_{m1} и E_{m2} находились коэффициент генерации дырок $m-1$ и сечение захвата инжектированных электронов заполненными дырочными ловушками σ_n . Для найденных параметров решалось дифференциальное уравнение, описывающее плотность захваченных дырок (уравнение решалось методом Рунге-Кутты-Фельберга 4-5-ого порядка). Затем эти решения суммировались, и находилась конечная плотность, для которой и определялось изменение напряжения, обусловленное накоплением в окисле положительного заряда. При моделировании МДП-структуры Si-SiO₂-Si* на двух из трёх участков вводились локальные электрические поля.

Катодное поле находилось путём решения уравнения нейтральности заряда (8).

На основе экспериментальных данных и результатов моделирования, проведенных в СКМ (системе компьютерной математики) Maple 15 [9], были определены параметры модели, характеризующие процессы изменения зарядового состояния МДП-структур с термической плёнкой SiO₂, пассивированной слоем ФСС, а также МДП-структур Si-SiO₂-Si*, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик.

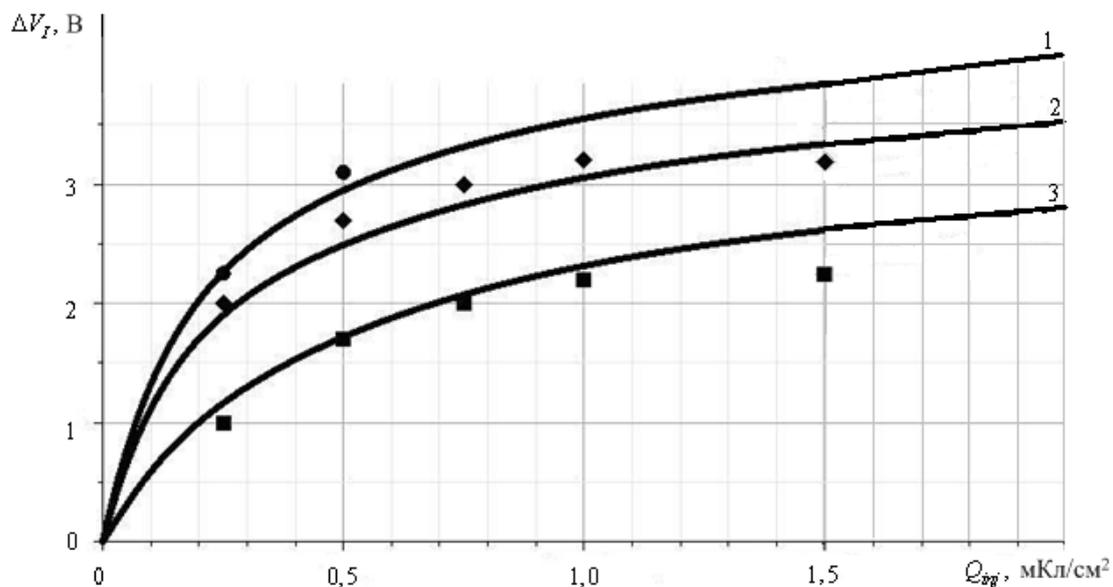


Рис.2. Зависимости изменения напряжения на МДП-структуре Si-SiO₂-ФСС-Al от величины инжектированного заряда при амплитудах туннельного тока 10⁻⁷ А, 10⁻⁶ А, 10⁻⁵ А - кривые 1, 2, 3 соответственно. Значками показаны экспериментальные данные, сплошными линиями – результаты моделирования

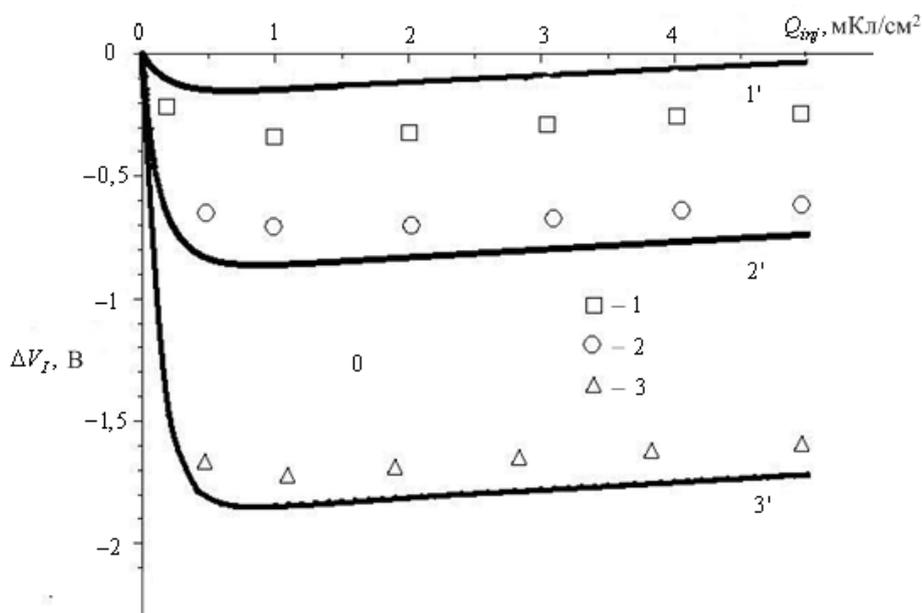


Рис.3. Зависимости напряжения на МДП-структуре Si-SiO₂-Si* от величины инжектированного заряда при плотностях туннельного тока 10⁻⁵ А/см² (1, 1'); 10⁻⁴ А/см² (2, 2'); 10⁻³ А/см² (3, 3'). Значками показаны экспериментальные данные, сплошными линиями – результаты моделирования

Как видно из приведённых зависимостей (рис.2, 3), результаты моделирования дают хорошее совпадение расчетных зависимостей с экспериментальными данными.

Установлено, что в МДП-структурах Si-SiO₂-Si* при сильнополевой инжекции заряда до 10 мКл/см² импульсами постоянного тока в диапазоне 10⁻⁵ – 10⁻³ А/см² зарядовая деградация диэлектрической плёнки обусловлена, в основном, накоплением положительного заряда, имеющего сильную полевую зависимость, что хорошо согласуется с моделью генерации дырок межзонной ударной ионизацией [5,6]. При большей плотности

инжектированного заряда существенное значение начинает играть захват электронов в диэлектрической пленке.

При аналогичных плотностях постоянного тока, подаваемого на МДП-структуру Si-SiO₂-ФСС-Al, её зарядовая деградация обусловлена, преимущественно, накоплением отрицательного заряда.

Применение указанной модели позволяет исследовать изменение зарядового состояния МДП-структур в широком диапазоне сильных электрических полей и инжекционных токов туннельной эмиссии по Фаулеру-Нордгейму, в том числе и за пределами экспериментальных возможностей.

Данная модель может найти широкое применение для прогнозирования поведения МДП-приборов, работающих в сильных электрических полях и при воздействии ионизирующих радиационных излучений.

Таким образом, в данной работе предложена модель изменения зарядового состояния МДП-структур Si-SiO₂-ФСС-Al и Si-SiO₂-Si* в условиях сильнополевой по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов из кремниевого электрода. Проведено моделирование и получены теоретические кривые зависимости изменения напряжения на МДП-структуре от величины инжектированного заряда в диапазоне плотностей токов 10⁻⁵ - 10⁻³ А/см². Проведено сравнение теоретически полученных данных с экспериментальными и сделан вывод о возможностях применения предложенной модели.

Список литературы

1. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С., Коротков С.И. Влияние температуры на инжекционную модификацию диэлектрических пленок МДП-структур// Перспективные материалы. 2008 № 5. С.26-30.
2. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Vasyutin D.S., Mikhal'kov A.M. Influence of High-Field Electron Injection Regimes on Modification of Dielectric Films of MOS Devices // Inorganic Materials: Applied Research. 2010. Vol.1. No.2. P.105–109.
3. Левин М.Н., Гитлин В.Р., Татаринцев А.В., Остроухов С.С., Кадменский С.Г. Рентгеновская корректировка пороговых напряжений в производстве МДП интегральных схем// Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6. С. 408-413.
4. Левин М. Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р. Моделирование процессов рентгеновской корректировки пороговых напряжений МДП-интегральных схем// Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 5. С.382-391.
5. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide// Phys. Rev. B. 1994. Vol.49. № 15. P.10278-10297.
6. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции// Микроэлектроника. 1997. № 6. С.640-646.
7. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields // Thin solid films. 2006 V.515. 670-673.
8. Chen C., Wu C. A characterization model for constant current stressed voltage-time characteristics of thin thermal oxides grown on silicon substrate // J. Appl. Phys. 1986. Vol.60. No.11. P.3926-3944.
9. Monagan M.B., Geddes K.O., Heal K.M., Labahn G., Vorkoetter S.M., McCarron J., DeMarco P. Maple Introductory Programming Guide// Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc. 2011.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК № 16.740.11.0151.

Research of generation and evolution of carrier traps in dielectric films of MIS-structures

77-30569/251437

11, November 2011

authors: D. Andreev, Stolyarov A.A., A. Romanov

Model describing generation and evolution of carrier traps in injection-modified multilayer nanosized dielectric films of MIS-structure in the mode of powerfield tunnel injection of electrons into dielectric with direct current. The parameters of model, which characterize the processes of charge state changing of MIS-structure with thermal film SiO₂ passivated with the PSG layer and MIS-structure Si-SiO₂ – polycrystalline silicon (Si-SiO₂-Si*), in the conditions of controlled powerfield tunnel injection of electrons into dielectric. The comparison of experimental and simulation data was carried out.

Publications with keywords: [charge state](#), [electron trap](#), [injection](#), [modification](#)

Publications with words: [charge state](#), [electron trap](#), [injection](#), [modification](#)

Reference

1. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Vasiutin M.S., Korotkov S.I., Perspektivnye materialy 5 (2008) 26-30.
2. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Vasyutin D.S., Mikhal'kov A.M., Influence of High_Field Electron Injection Regimes on Modification of Dielectric Films of MOS Devices, Inorganic Materials: Applied Research 1 (2) (2010) 105–109.
3. Levin M.N., Gitlin V.R., Tatarintsev A.V., Ostroukhov S.S., Kadenskii S.G., Mikroelektronika 31 (6) (2002) 408-413.
4. Levin M. N., Tatarintsev A.V., Makarenko V.A., Gitlin V.R., Mikroelektronika 35 (5) (2006) 382-391.
5. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J., Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide, Phys. Rev. B. 49 (15) (1994) 10278-10297.
6. Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Shakhnov V.A., Mikroelektronika 6 (1997) 640-646.
7. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A., Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields, Thin solid films 515 (2006) 670-673.
8. Chen C., Wu C., A characterization model for constant current stressed voltage-time characteristics of thin thermal oxides grown on silicon substrate, J. Appl. Phys. 60 (11) (1986) 3926-3944.
9. Monagan M.B., Geddes K.O., Heal K.M., Labahn G., Vorkoetter S.M., McCarron J., DeMarco P., Maple Introductory Programming Guide, Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc., 2011.