

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ И СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

*Ташкентский государственный технический университет им. А.Р. Беруни,
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Узбекистан*

Принцип действия приборов с зарядовой связью (ПЗС) и интегральных схем (ИС) основан на физическом процессе, происходящем в структуре металл – окисел – полупроводник (МОП). Привычным и основным этапом получения ПЗС и ИС является образование Si – SiO₂ системы.

Известно, что система Si – SiO₂ образуется, в основном, путем термического окисления кремния; МОП структура получается путем металлизации образца со стороны SiO₂. Качество этих приборов определяется в первую очередь электрофизическим состоянием Si – SiO₂ системы [1 – 4].

В работе [5] показан способ получения тонких пленок оксида кремния. Предлагается трех-этапное окисление кремния в сухом кислороде. При таком технологическом режиме окисления плотность поверхностных состояний на границе Si – SiO₂ систем оказывается более стабильной. Устойчивость плотности поверхностных состояний Si – SiO₂ систем зависит в основном от начальной стадии образования оксида кремния.

В [6] нами разработан новый способ получения МОП – структуры на основе кремния. Благодаря специальному режиму окисления и последующей металлизации, полученная МОП – структура обладает стабильной вольтфарадной характеристикой. Стабильность вольтфарадных характеристик обусловлена, в свою очередь, стабильностью поверхностных состояний. Приборы полученные вышеуказанным методом имеют то преимущество, что их параметры можно регулировать во время изготовления, то есть этим методом можно изготавливать приборы с заданными параметрами, необходимыми для тех или иных целей.

В работе [7] специальным режимом внедрения ионов получен субмикронный *p – n* переход. Одной из особенностей таких приборов является скачкообразный (резкий) переходный слой, сверхтонкая толщина *p – n* перехода. *P – n* переход, полученный другим способом не обладает такими качествами. Кроме того, этот способ позволяет создать на одной операции несколько сот подобных структур при помощи специального приспособления.

Анализ литературных данных показывает, что управление свойствами Si – SiO₂ структуры позволяет стабилизировать электрофизические свойства и управлять параметрами ПЗС и ИС.

В связи с этим возникает целый ряд задач, разрешение которых требует проведения исследований атомно–молекулярной природы зарядов в Si – SiO₂ системах. Величина и стабильность поверхностного потенциала окисленного кремния сильно зависит от параметров самого окисляемого кремния (от типа проводимости образца, концентрации примесей, плотности дислокации и т.д.), а также от условий окисления. Поэтому важно научиться получать нужный потенциал поверхности кремния именно в процессе формирования окисной пленки.

В работах [6 – 7] доказано, что поверхностный потенциал окисленного кремния обусловлен точечными дефектами различного типа. Заряды на границе Si – SiO₂ и в объеме SiO₂ обусловлены именно этими дефектами. Образование избыточных точечных дефектов при элементарном акте взаимодействия поверхности твердого тела с кислородом объясняется теорией одного из авторов статьи [5]. Изучение поведения точечных дефектов, образующихся в процессе термического окисления, их релаксации и возможного управления концентрацией является одним из проблемных вопросов на современном этапе изготовления ПЗС и ИС.

В данной работе мы попытались описать зависимость концентрации точечных дефектов (*n*) и кинетику их релаксации от условий окисления.

В работах [4, 5] рассмотрена природа точечных дефектов в элементарных и бинарных соединениях. Дефекты по Шоттки и по Френкелю могут генерироваться и отжигаться в каждой из подрешеток. С учетом генерации и отжига точечных дефектов для скорости изменения последних, было предложено выражение:

$$\frac{dn}{dt} = NK_r - nK_{OT}, \quad (1)$$

где N и n – концентрация в подрешетке атомов и точечных дефектов соответственно; K_r и K_{OT} – постоянные скорости генерации и отжига соответственно, при $t \rightarrow \tau_\infty, n \rightarrow n_\infty$; τ_∞ – время окисления, по истечении которого рост окисления подчиняется параболическому закону:

$$n_\infty = N \frac{K_r}{K_{OT}} = Ne^{-\varepsilon/kT} \quad (2)$$

$$K_r = K_{or} e^{-\varepsilon/kT} \quad (3)$$

$$K_{OT} = K_{OOT} e^{-U/kT} \quad (4)$$

$$K_{or} = \frac{1}{\tau_{or}} \quad (5)$$

$$K_{OOT} = \frac{1}{\tau_{OOT}} \quad (6)$$

$$T = T_0 e^{-t/\tau_y}, \quad (7)$$

где K_r и K_{OT} – константа скорости генерации и отжига точечных дефектов, соответственно; ε и U – энергии образования и перемещения точечных дефектов, соответственно; τ_y – постоянная охлаждения; t – время окисления; T_0 – комнатная температура; T – температура окисления; k – постоянная Больцмана.

С учетом (2), (3), (5) и (6) уравнение (1) примет вид:

$$\frac{dn}{dt} = NK_{or} \left(e^{\frac{\varepsilon}{kT_0}} \right)^{e^{\frac{t}{\tau_y}}} - n \frac{1}{\tau_{OOT}} \left(e^{\frac{U}{kT_0}} \right)^{e^{\frac{t}{\tau_y}}} \quad (8)$$

Это уравнение можно решать как аналитически, так и численно на ЭВМ. Решение этого уравнения даст нам ответ на вопрос по какому закону изменяется концентрация дефектов на границе Si и SiO₂, а также в объеме SiO₂. Ниже приведем аналитическое решение уравнения (8).

Для удобства введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} dn &= dy; & dt &= dx; & \tau_y &= a \\ n &= y; & t &= x; & NK_{or} &= A \\ B &= -\frac{\varepsilon}{kT_0}; & C &= -\frac{U}{kT_0}; & \tau_{OOT} &= b \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

С учетом (9) уравнение (8) приобретает вид:

$$\frac{dy}{dx} = A(e^B)^{e^{x/a}} - y \cdot \frac{1}{b}(e^C)^{e^{x/a}} \quad (10)$$

Теперь уравнение (10) напишем в виде:

$$y' + g(x)y = f(x) \quad (11)$$

$$g(x) = \frac{1}{b}(e^C)^{e^{x/a}} \quad (12)$$

$$f(x) = A(e^B)^{e^{x/a}} \quad (13)$$

Решение уравнения (10) ищем в виде

$$y = d + kx + Mx^2 \quad (14)$$

Дифференцируя (14), получим

$$\frac{dy}{dx} = k + 2Mx \quad (15)$$

После подстановки (15) в (10) получается выражение в виде:

$$k + 2Mx = A(e^B)^{e^{x/a}} - \frac{d + kx + Mx^2}{b}(e^C)^{e^{x/a}} \quad (16)$$

Дальнейшее решение уравнения (16) путем применения математического преобразования, позволяет прийти к окончательному виду уравнений (8) или (10):

$$\begin{aligned} y &= k \left(\frac{2b}{1+c} - a - \frac{a}{C} \right) + \frac{ABb}{C} + \frac{AbC}{C} + \frac{AbC - ABb}{3Cb - 2aC - aC^2 - a} x - \frac{kC}{a(1+C)} x^2 = \\ &= \frac{AbC - ABb}{3Cb - 2aC - aC^2 - a} \left(\frac{2b}{1+C} - a - \frac{a}{C} \right) + \frac{ABb}{C} + \frac{AbC - ABb}{3Cb - 2aC - aC^2 - a} x - \\ &- \frac{AbC - ABb}{3Cb - 2aC - aC^2 - a} \cdot \frac{C}{a(1+C)} x^2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{-NK_{or} \tau_{0OT} \frac{U}{kT_0} + NK_{or} \tau_{0OT} \frac{\varepsilon}{kT_0}}{-3 \frac{U}{kT_0} \tau_{0OT} + 2\tau_y \frac{U}{kT_0} - \tau_y \frac{U^2}{(kT_0)^2} - \tau_y} \left(\frac{2\tau_{0OT}}{1 - \frac{U}{kT_0}} - \tau_y + \frac{\tau_y}{\frac{U}{kT_0}} \right) + \\ &+ NK_{or} \frac{\varepsilon}{kT} \tau_{0OT} \frac{1}{\frac{U}{kT_0}} + \frac{-NK_{or} \tau_{0OT} \frac{U}{kT_0} + NK_{or} \tau_{0OT} \frac{\varepsilon}{kT_0}}{-3 \frac{U}{kT_0} \tau_{0OT} + 2\tau_y \frac{U}{kT_0} - \tau_y \frac{U^2}{(kT_0)^2} - \tau_y} x - \\ &- \frac{-NK_{or} \tau_{0OT} \frac{U}{kT_0} + NK_{or} \tau_{0OT} \frac{\varepsilon}{kT_0}}{-3 \frac{U}{kT_0} \tau_{0OT} + 2\tau_y \frac{U}{kT_0} - \tau_y \frac{U^2}{(kT_0)^2} - \tau_y} \cdot \frac{-\frac{U}{kT_0}}{\tau_y \left(1 - \frac{U}{kT_0} \right)} x^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Таким образом, при помощи уравнения (18) можно определить концентрацию точечных дефектов (n). В зависимости от условий окисления n изменяется в широких пределах. Из анализа экспериментальных данных [7] t следует взять в интервале $0 \leq t \leq \tau_y$. τ_y – постоянная охлаждения, по порядку величины, равная τ_∞ . Можно решить обратную задачу, то есть задавая n можно найти τ_y . Это означает, что при помощи уравнения (18) можно прогнозировать концентрацию n , то есть составить целенаправленный программированный режим окисления, что весьма важно для создания качественного ПЗС и ИС и других аналогичных микроэлектронных приборов.

Следует отметить, что уравнение (8) можно решать также методом Рунге – Кутты и построить график зависимости n от времени t . Решая уравнение (3) аналитически, получим уравнение вида (18). На основе этого уравнения также можно получить номограмму зависимости n от t .

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафаров А.С. Новые проблемы при образовании оксида кремния // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. Вып. 1. С. 73–75.
2. Сафаров А.С. Свойства и состав сверхтонких пленок диоксида кремния, полученных термическим окислением // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. Вып. 3. С. 371–373.
3. Safarov A.S. Anodic oxidation of Ion – Oloped Silicon and Properties of Si/SiO₂ Structures // Inorganic Materials. 1997. Vol. 33. № 12. P. 1210–1212.
4. Арсламбеков В.А. Влияние точечных дефектов на кинетику и механизм роста окисных пленок // В сб.: Проблемы физической химии поверхности полупроводников / Под. ред. Ржанов А.В., Новосибирск, 1978. С. 107–154.
5. Сафаров А.С. Расчет некоторых параметров приборов с зарядовой связью на основе Si – SiO₂ систем // Проблемы микроэлектроники Т., 1986, С. 54–59.
6. Сафаров А.С. А.С. СССР № 1702822, Способ получения тонких пленок оксида кремния, 1991.
7. Сафаров А.С.и др. А.С. СССР № 1797404, Способ получения полупроводниковых структур, 1992.

Поступила 24.12.02

Summary

In the work mentioned, that density of surface charges can be increased with difference of contact potentials (DCP). Proved, that starting from depth of about 0,4 micrometers increase in anode oxidation speed is observed. Possibility determination of distribution profile of monolegirrated mixtures through the semiconductors depth is proved.
