

Применение ионизирующего излучения для ускоренных испытаний МОП интегральных схем

Чжо Ко Вин

Приводится сравнение процессов старения МОП интегральных микросхем при ускоренных испытаниях при повышенной температуре и при низкоинтенсивном воздействии ионизирующего излучения. Получено соотношение между температурой при ускоренных испытаниях и мощностью дозы ионизирующего излучения при одинаковом накоплении поверхностных дефектов.

При хранении или эксплуатации планарных полупроводниковых приборов наблюдаются процессы релаксации заряда в объёме оксидной плёнки и накопления дефектов на границе раздела оксид-кремний. В настоящее время для ускоренных испытаний на надёжность используется повышенная температура. Однако значительное повышение температуры (до 200 °С и более) приводит к искажению реальной ситуации – на первый план выходят механизмы отказов, которые не проявляются при обычных температурах [1]. Кроме того, для испытаний при повышенной температуре требуются значительные временные и энергетические затраты. Поэтому предлагается использование облучения ионизирующим излучением для выявления отказов, связанных со старением структуры оксид кремния-кремний, являющейся основой не только МОП интегральных схем (ИС), но и других планарных микросхем.

При воздействии ионизирующего излучения (ИИ) процесс старения значительно ускоряется. В данной работе на основании экспериментальных данных, полученных для КМОП ИС типа 564ЛА9, проводился поиск соответствия результатов ускоренных испытаний при повышенной температуре и при воздействии ИИ.

В качестве основного механизма старения рассматривается процесс образования поверхностных состояний (ПС) в планарных микросхемах. Поскольку образование ПС происходит во времени, то использовалось соотношение $t = D/P$, в котором D – доза ИИ, P – мощность дозы и t – время. На рис. 1 представлены результаты испытаний при повышенной (150 °С) температуре, проведённые автором, а также результаты облучения быстрыми электронами, взятые из [2]. В случае ускоренных испытаний при повышенной температуре и при облучении использовался одинаковый электрический режим.

Для определения плотности ПС в облучённых МОП транзисторах использовалась методика, описанная в [3]. Она заключается в расчёте сдвига порогового напряжения МОП транзисторов ΔU_{ot} , вызванного накоплением заряда в объёмных оксидных ловушках, и в вычитании его из измеренного значения порогового напряжения ΔU_0 . В этом случае получаем

$$\Delta U_{it} = \Delta U_0 - \Delta U_{ot}.$$

Из полученного значения ΔU_{it} определялось изменение плотности ПС ΔN_{it} для известного значения толщины подзатворного диэлектрика $d_{ox} = 100$ нм. В случае ускоренных испытаний при повышенной температуре использовалась методика подпороговых токов, описанная в [4].

При радиационном воздействии изменение плотности ПС описывается выражением [5]

$$\Delta N_{it} = (\Delta N_{it})_{HAC} [1 - e^{-(\alpha \cdot P \cdot t)}],$$

где P – мощность дозы, t – время облучения, α – параметр.

При повышенной температуре плотность ПС описывается выражением [6]

$$\Delta N_{it} = (\Delta N_{it})_{HAC} [1 - e^{-(\omega t)}],$$

где ω – параметр, зависящий от концентрации примеси и температуры.

Значение ω рассчитывается с помощью выражения [6]

$$\omega = \pi \cdot d^2 \cdot V_T \cdot N_{np} \cdot K_{rel} \cdot \exp\left(\frac{E_{SB} - F}{K \cdot T}\right),$$

в котором d – длина связи $Si-Si$, V_T – тепловая скорость дырок, K_{rel} – коэффициент связи между количеством разорванных и релаксированных связей, N_{np} – концентрация примеси в полупроводнике, E_{SB} – энергетический уровень напряжённых валентных связей, F – уровень Ферми, K – константа Больцмана, T – температура.

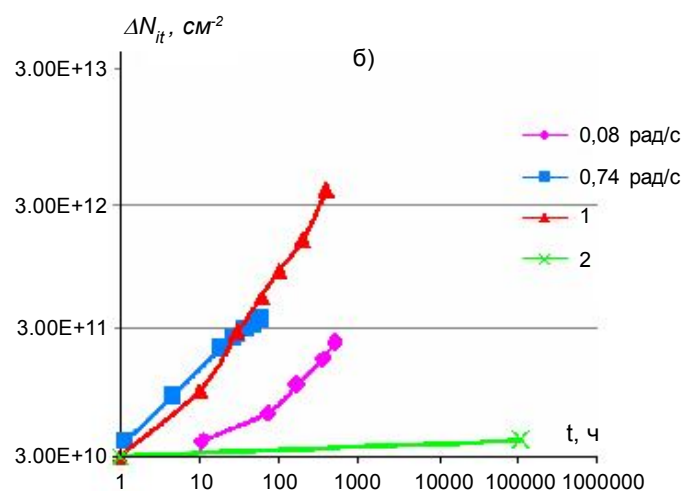
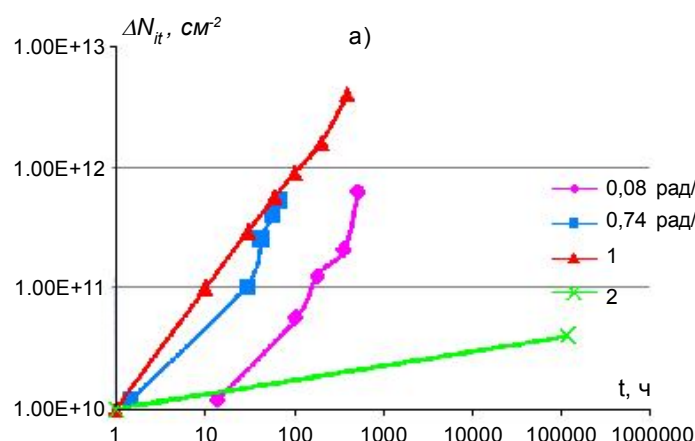


Рис. 1

Зависимости плотности ПС для МОП транзисторов с n-каналом (а) и с p-каналом (б) в случае испытаний при температуре $T = 150$ °С (1), при нормальной температуре (2), при облучении электронами с мощностью дозы $P = 0,08$ рад/с и $0,74$ рад/с

Ускоренные испытания при повышенной температуре $T = 150$ °С проводились в течение 392 часов. Результат испытаний представлен на рис. 1 (кривая 1). Как можно видеть, зависимости $\Delta N_{it}(t)$, полученные при низкоинтенсивном облучении быстрыми электронами при мощности дозы $P = 0,74$ рад/с и при ускоренных испытаниях, практически совпадают как для МОП транзисторов с n-каналом (рис. 1а), так и с p-каналом (рис. 1б). Для сравнения на рис. 1 (кривая 2) показан процесс старения в пассивном режиме (в режиме хранения). Микросхемы хранились в течение 13 лет – и выявился процесс образования ПС в пассивном режиме [7].

Сравнение результатов, представленных на рис. 1, показывает возможность применения ионизирующего излучения для проведения ускоренных испытаний на старение ИМС, поскольку основным эффектом является образование ПС. Представленные на рис. 1 зависимости характеризуются следующими коэффициентами ускорения при повышенной температуре

$$K_T = \frac{(N_{it})_{нач} + \Delta N_{it}}{(N_{it})_{нач}} = 1,61$$

$$K_D = \frac{(N_{it})_{нач} + \Delta N_{it}}{(N_{it})_{нач}} = 1,57.$$

и при низкоинтенсивном облучении быстрыми электронами

Соотношение между повышенной температурой T и мощностью дозы P имеет вид

$$P = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot V_T \cdot N_{np} \cdot K_{rel} \cdot \exp\left(\frac{E_{SB} - F}{K \cdot T}\right)}{\alpha}$$

При значениях P и T , удовлетворяющих этому соотношению, имеем одинаковое изменение плотности ПС при ускоренных испытаниях.

При более низкой мощности дозы ($P = 0,08$ рад/с) наблюдается более низкий темп образования ПС (рис. 1). Поэтому для получения больших значений коэффициентов ускорения необходимо производить облучение ИИ при более высокой мощности дозы. Однако если для сокращения длительности испытаний увеличивать мощность дозы, то будет возрастать $\Delta U_{от}$, как это можно видеть на рис. 2, что не соответствует ускоренным испытаниям при повышенной температуре. Поэтому мощность дозы может быть увеличена незначительно (до $P \approx 1,0$ рад/с).

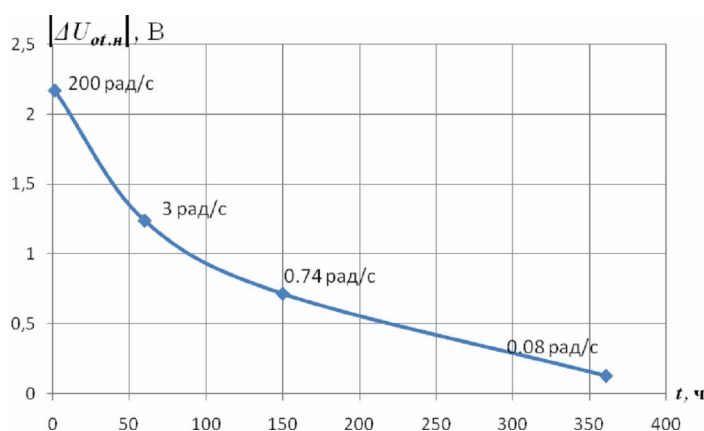


Рис. 2

Зависимость сдвига порогового напряжения $\Delta U_{от}$, вызванного зарядом в объеме подзатворного оксида при насыщении дозовой зависимости, для МОП транзисторов с п-каналом при облучении электронами с разными значениями мощности дозы

Таким образом, использование низкоинтенсивного облучения позволит значительно уменьшить энергозатраты на проведение ускоренных испытаний МОП ИМС при использовании изотопных источников быстрых электронов или гамма-лучей, так как для их использования не требуется потребление энергии. Кроме того, предоставляется возможность немного сократить длительность испытаний как на срок функционирования, так и на срок хранения ИМС.

Автор выражает благодарность профессору Попову В. Д. за консультации при выполнении исследований.

Литература

1. Горлов М., Строгонов А. Геронтология кремниевых интегральных схем. Часть 1. // Chip News. – 2000. – № 3. – С. 22-25.
2. Моделирование радиационных эффектов в КМОП ИС при воздействии электронного облучения различной интенсивности / В. В. Емельянов, О. В. Мещуров, В. Ш. Насибуллин, Р. Г. Усеинов // Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – М.: ЦНИИАтоминформ. – 1995. – Вып. 1-2. – С. 51-58.
3. Орлова А. Ю., Попов В. Д. Роль эмиссии электронов при образовании поверхностных состояний в МОП-структуре при облучении гамма-лучами // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2010» – М.: НИЯУ МИФИ. – 2010. – Вып. 13. – С. 45-46.
4. McWhorter, Winokur P.S. Simple technique for separating the effects of interface traps and charge metal-oxide-semiconductor transistors. // J.Appl.Phys.Lett. – 1986. – V. 48. – № 1. – P. 133-135.
5. Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов А. В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем – М.: Энергоатомиздат. – 1988.
6. Физическая модель процесса старения МОП-структуры / М. А. Булушева, В. Д. Попов, Г. А. Протопопов, А. В. Скородумова // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – Вып. 4. – С. 527-532.
7. Белова Г. Ф., Попов В. Д., Селуянова Т. А. Анализ изменения параметров МОП транзисторов при длительном хранении КМОП ИМС // Научная сессия МИФИ – 2004. – М.: МИФИ. – 2004. Т. 1. – С. 91-92.