

запрещенной зоны, k_B — постоянная Больцмана). Находя ΔT из равенства $C_p \Delta T = \hbar \omega \int_0^{\Delta t} \omega dt$, где C_p — теплоемкость образца, ω — число электронных переходов за 1 с, и приняв $C_p = 10^7$ эрг/см³·град, получим $10^{-7} \leq \Delta t \leq 10^{-5}$ с.

Список литературы

- [1] Во Хонг Ань. Теория параметрического воздействия электромагнитного излучения большой мощности на твердое тело. М., 1985. 196 с.
- [2] Эпштейн Э. М., Шмелев Г. М., Цуркан Г. И. Фотостимулированные процессы в полупроводниках. Кишинев, 1987. 168 с.
- [3] Эпштейн Э. М. // Письма ЖЭТФ. 1971. Т. 13. В. 9. С. 511—513.
- [4] Гуревич В. Л., Паршин Д. А. // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. В. 4. С. 1589—1599.
- [5] Вязовский М. В. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 1. С. 194—197.
- [6] Павлович В. В., Эпштейн Э. М. // ФТТ. 1974. Т. 16. В. 7. С. 2141—2145.
- [7] Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М., 1977. 672 с.
- [8] Такер Дж., Рэмpton В. Гиперзвук в физике твердого тела. М., 1975. 453 с.
- [9] Эльбаум Ч., Фьелдди Т., Ишигуро Т. // Физика фононов больших энергий. М., 1976. С. 112—121.

Волгоградский государственный педагогический институт им. А. С. Серафимовича

Получено 31.07.1989
Принято к печати 8.01.1990

ФТП, том 24, вып. 5, 1990

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЗАРЯДА ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ—ДИЭЛЕКТРИК—ПОЛУПРОВОДНИК

Крылов Д. Г., Ладыгин Е. А.

При воздействии быстрых электронов на структуру металл—диэлектрик—полупроводник в ней наблюдается ряд физических процессов: генерация поверхностных состояний (ПС) на границе раздела полупроводник—диэлектрик, накопление заряда в подзатворном диэлектрике и образование радиационных центров в полупроводниковой подложке [1]. Типичным диэлектриком в структурах металл—диэлектрик—полупроводник является термический окисел кремния (МОП структура). Накопление зарядов в окисле и на границе раздела вызывает сдвиг характеристик МОП структуры — вольтфарадных (МОП конденсатор) или подпороговых ВАХ (МОП транзистор). Разделить вклады зарядов трудно из-за сложности определения заряда ПС (границы раздела). В ряде работ [2, 3] предложен способ оценки заряда подзатворного окисла, основанный на предположении о том, что заряд ПС равен нулю при совпадении на границе раздела кремний—окисел кремния уровня Ферми с серединой запрещенной зоны кремния. Заряд окисла легко определяется из сдвига напряжения, при котором выполняется это условие совпадения. Данный способ применим в измерениях ВФХ, но при снятии подпороговых ВАХ сложно реализовать условие совпадения из-за наличия токов утечки, а экстраполяция характеристики является процедурой сложной и значительно снижает точность оценки. В данной работе предлагается иной способ оценки заряда окисла применительно к комплементарным МОП структурам.

Особенность технологии КМОП структур заключается в том, что подзатворный окисел *n*- и *p*-канальных транзисторов создается одновременно [4]. В ряде работ [1, 5] показано, что при уровнях легирования кремниевой подложки до 10^{16} см⁻³ тип проводимости, характер и концентрация легирующей примеси слабо влияют на свойства подзатворного окисла и границы раздела. Поэтому можно предположить, что заряды подзатворного окисла *n*- и *p*-канальных транзисторов КМОП структуры одинаковы.

Другим необходимым предположением является идентичность распределений плотности ПС на границе раздела n - и p -канальных транзисторов КМОП структуры. Кроме того, примем существование энергетического уровня E_0 в запрещенной зоне кремния, выше которого ПС имеют акцепторный характер, ниже — донорный. При совпадении уровня Ферми с уровнем E_0 заряд границы раздела равен нулю.

Проведем вывод аналитических выражений методики оценки заряда подзатворного окисла Q_d . Напряжение на затворе U_s МОП транзистора можно представить следующим образом:

$$U_s = \varphi_{мп} - \frac{Q_d + Q_{пс} + Q_{пп}}{C_d} + \varphi_{п}, \quad (1)$$

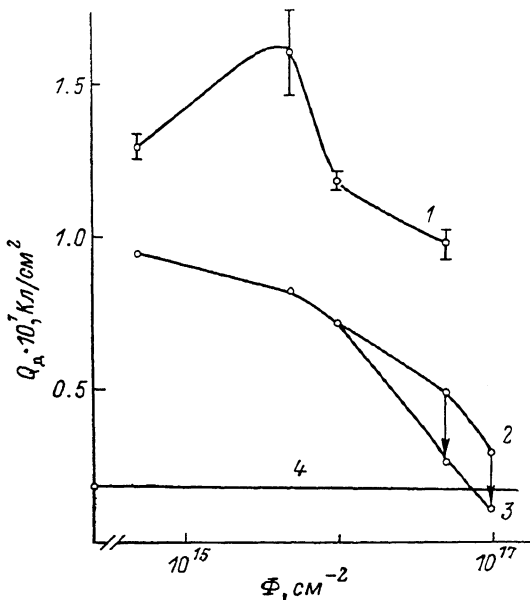
где $\varphi_{мп}$ — контактная разность потенциалов металл—полупроводник, C_d — удельная емкость окисла, $\varphi_{п}$ — поверхностный потенциал, $Q_{пс}$ и $Q_{пп}$ — заряды ПС и области пространственного заряда полупроводника соответственно.

Задавая подпороговый ток стока I_c , измеряем соответствующие напряжения затвора U_{s1} и U_{s2} (индексы 1 и 2 обозначают n - и p -канальные транзисторы соответственно). Из выражения (2) [6] определяем значения поверхностного потенциала $\varphi_{п1}$ и $\varphi_{п2}$

$$I_c = \frac{2.7Z\mu n_i^2}{qL} \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 \left(\frac{kT}{N}\right)^3} \int_1^{\sqrt{\beta\varphi_{п1}-1}} \times \exp(x^2) dx, \quad (2)$$

Рис. 1. Поточковая зависимость заряда подзатворного окисла КМОП структур.

Длительность отжига, мин: 1 — 5; 2, 3 — 240; 3 — потоковая зависимость с учетом изменения концентрации электрически активных центров в кремнии; 4 — уровень заряда в исходных КМОП структурах.



где Z и L — ширина и длина канала МОП транзистора соответственно, n_i — собственная концентрация полупроводника, μ — подвижность носителей заряда в канале, ϵ_0 и ϵ — абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости соответственно, T — температура, N — концентрация примеси в полупроводнике, q — заряд электрона, k — константа Больцмана, $\beta = kT/q$.

Предположим, что плотность ПС постоянна в области энергий $[E_2; E_1]$, где E_1 и E_2 — положения уровня Ферми на границе раздела n - и p -канальных транзисторов соответственно,

$$E_1 = F_1 + q\varphi_{п1}, \quad (3)$$

$$E_2 = F_2 - q\varphi_{п2}, \quad (4)$$

F_1 и F_2 — положения уровня Ферми в объеме полупроводника n - и p -канальных транзисторов соответственно.

Представим заряд ПС в виде (5) и (6) для n - и p -канальных транзисторов соответственно

$$Q_{пс1} = -qN_{пс}(E_1 - E_0), \quad (5)$$

$$Q_{пс2} = qN_{пс}(E_0 - E_2). \quad (6)$$

Зная концентрацию примеси в приграничных областях полупроводника транзисторов КМОП структуры, преобразуем выражение (1) в виде

$$A_1 = C_d (U_{a1} - \varphi_{п1} - \varphi_{мп1}) + Q_{пп1} = -Q_d + qN_{пс} (E_1 - E_0), \quad (7)$$

$$A_2 = C_d (U_{a2} - \varphi_{п2} - \varphi_{мп2}) + Q_{пп2} = -Q_d - qN_{пс} (E_0 - E_2). \quad (8)$$

Тогда получим аналитические выражения для расчета заряда подзатворного окисла и плотности ПС

$$Q_d = -(qN_{пс} (E_1 + E_2 - 2E_0) + A_1 + A_2)/2, \quad (9)$$

$$N_{пс} = \frac{(A_1 - A_2)}{q(E_1 - E_2)}. \quad (10)$$

Предлагаемая методика опробована при оценке заряда подзатворного окисла КМОП структур до и после облучения быстрыми электронами. В качестве исследуемых структур были выбраны элементы КМОП микросхемы 176ЛП1. Облучение структур проводилось электронами с энергией 6 МэВ потоками $5 \cdot 10^{14} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$, после чего проводился изотермический отжиг на воздухе при температуре 200°C . Оценка заряда подзатворного окисла КМОП структур

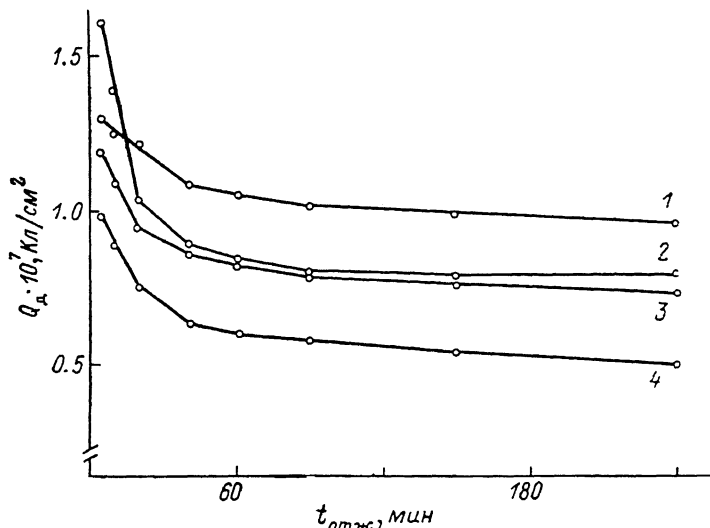


Рис. 2. Зависимость заряда подзатворного окисла КМОП структур от длительности отжига при 200°C после облучения потоками быстрых электронов.

Φ , см^{-2} : 1 — $5 \cdot 10^{14}$, 2 — $5 \cdot 10^{15}$, 3 — 10^{16} , 4 — $5 \cdot 10^{16}$.

проводилась по данным измерений подпороговых ВАХ. Величина поверхностного потенциала, положение уровня Ферми на границе раздела задавались током стока транзисторов ($\sim 10^{-9} \text{ A}$). При расчетах за уровень E_0 принят в соответствии с [2] уровень середины запрещенной зоны кремния.

Результаты исследования кинетики изменения заряда подзатворного окисла с ростом потока быстрых электронов для двух значений длительности отжига показаны на рис. 1. Для длительности отжига 240 мин наблюдается монотонное убывание заряда с ростом потока. Для длительности отжига 5 мин наблюдается максимум при потоке $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При оценке заряда в КМОП структурах, облученных потоком $5 \cdot 10^{16}$ и 10^{17} см^{-2} , необходимо учитывать снижение концентрации электрически активных центров в приграничной области кремния n -канального транзистора от $3 \cdot 10^{16}$ до 10^{16} см^{-3} .

Обратимый характер потоковой зависимости заряда подзатворного окисла обуславливается, вероятно, суммарным действием двух процессов в объеме окисла. Первый процесс связан с накоплением положительного заряда на дырочных ловушках, второй — с захватом электронов на генерируемые облучением глубокие ловушки, плотность которых увеличивается с ростом потока быстрых электронов [7]. При потоках выше $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ второй процесс становится определяющим накоплением заряда в подзатворном окисле. Кроме того,

наблюдаемая при облучении быстрыми электронами потоком выше $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ структурная перестройка границы раздела кремний—окисел кремния может привести к снижению плотности дырочных ловушек, локализованных вблизи этой границы [1].

Результаты исследования кинетики отжига заряда подзатворного окисла показаны на рис. 2. Наблюдается частичный отжиг накопленного при облучении заряда. С ростом потока происходит параллельный сдвиг временной зависимости в сторону меньших значений.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить заряд подзатворного окисла КМОП структур до и после воздействия быстрых электронов. Опробование методики при исследовании элементов КМОП микросхем 176ЛП1 позволило обнаружить обратимый характер потоковой зависимости накопленного при облучении заряда. Возможной причиной наблюдаемого эффекта может быть захват электронов в подзатворном окисле генерируемыми облучением глубокими ловушками. Показано, что при температуре 200°C происходит частичный отжиг заряда подзатворного окисла. Данная методика может быть использована при исследовании влияния различных внешних факторов на структуры металл—диэлектрик—полупроводник.

Список литературы

- [1] Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов А. В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М., 1988. 256 с.
- [2] McWhorter P. J., Winokur P. S. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. N 2. P. 133—135.
- [3] Dozier C. M., Brown D. B., Freitag R. K., Throckmorton J. L. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986. V. 33. N 6. P. 1324—1329.
- [4] Технология СВИС. Т. 2. / Под ред. С. Зи. М., 1986. 453 с.
- [5] Winokur P. S., Schwank J. R., McWhorter P. J., Dressendorfer P. V., Turpin D. C. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1984. V. 31. N 6. P. 1453—1460.
- [6] Крылов Д. Г. // Электрон. техн. Сер. 2. 1989. № 3. С. 79—83.
- [7] Gdula R. A. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1979. V. 26. N 4. P. 644—647.

Московский
институт стали и сплавов

Получено 25.09.1989
Принято к печати 17.01.1990