

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИКАХ МДП СТРУКТУР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

МНОП СТРУКТУРЫ $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-Me}$

Гуртов В. А., Травков И. В.

Рассмотрены процессы накопления объемного заряда в МНОП структурах с двуслойным диэлектриком. Показано, что немонотонная зависимость напряжения плоских зон ΔV_{FB} от внешнего напряжения V_G при облучении обусловлена конкуренцией трех механизмов образования радиационно-индуцированного заряда: накопления дырочного заряда в слое двуокиси кремния, полевого разделения носителей в нитриде кремния и инжекции носителей из полупроводникового электрода. Показано, при каких параметрах модели наблюдается совпадение расчета и эксперимента.

Введение. В МНОП структурах с двуслойным диэлектриком двуокись кремния—нитрид кремния $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-Me}$ характер накопления радиационно-индуцированного заряда (РИЗ) существенно отличается от характера накопления РИЗ в МОП структурах с двуокисью кремния SiO_2 [1, 2]. В предыдущей работе [3] авторы рассмотрели особенности накопления РИЗ в МОП структурах с учетом термализации, диффузии, рекомбинации, инжекции из контактов и туннельного освобождения с дырочных центров в диэлектрике. В предлагаемой статье предпринята попытка распространить этот подход на МНОП структуры.

1. Постановка задачи

Принципиальное отличие объекта моделирования от рассмотренного в работе [3] состоит в присутствии слоя нитрида кремния. В связи с этим возникают следующие основные моменты: 1) наличие потенциальной ямы для электронов (при напряжении на затворе $V_G < 0$) или дырок (при $V_G > 0$) около границы раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ из-за разной ширины запрещенной зоны этих диэлектриков; 2) разные диэлектрические проницаемости и концентрации ловушек в слоях двуокиси SiO_2 и нитрида Si_3N_4 кремния; 3) в отличие от двуокиси кремния подвижность дырок в нитриде кремния сравнима с подвижностью электронов; 4) туннельные токи из кремния в нитрид кремния начинают оказывать заметное влияние на величину изменения напряжения плоских зон ΔV_{FB} при меньших полях в случае туннельно-тонких слоев окисла; 5) в Si_3N_4 большое значение имеют захват электронов и дырок на ловушки и рекомбинация локализованных носителей разного знака между собой.

Задача, как и в [3], сводится к решению системы уравнений, включающей в себя уравнение Пуассона, уравнения непрерывности для свободных носителей и уравнения кинетики для захвата носителей. Вид уравнений, граничных условий и начальных данных аналогичен описанному в [3]. Основные изменения заключаются в следующем.

а) Начало отсчета оси X помещено на межфазной границе раздела (МФГР) Si-SiO_2 , поэтому выделяются две области — O_I при $x < d_{ox}$ (слой двуокиси кремния) и O_{II} при $d_{ox} < x < d_N$ (слой нитрида кремния).

б) Функции, являющиеся параметрами модели [такие как $\mu_{n,p}$, $E_{i.n.p}(x)$, $N_{i.n}(x)$, $N_{i.p}(x)$], задаются в виде $f(x)=f_{ox}(x)$ при $x \in O_I$, $f(x)=f_N(x)$ при $x \in O_{II}$.

в) Учен потенциалный барьер на МФГР $SiO_2-Si_3N_4$, поэтому при решении уравнения непрерывности потенциал φ для электронов задается $\varphi(x) = -\varphi(x) + 1.5$ эВ ($x \in O_{II}$); в модель введены как туннельный, так и надбарьерный процессы переброса электронов и дырок через барьер $SiO_2-Si_3N_4$.

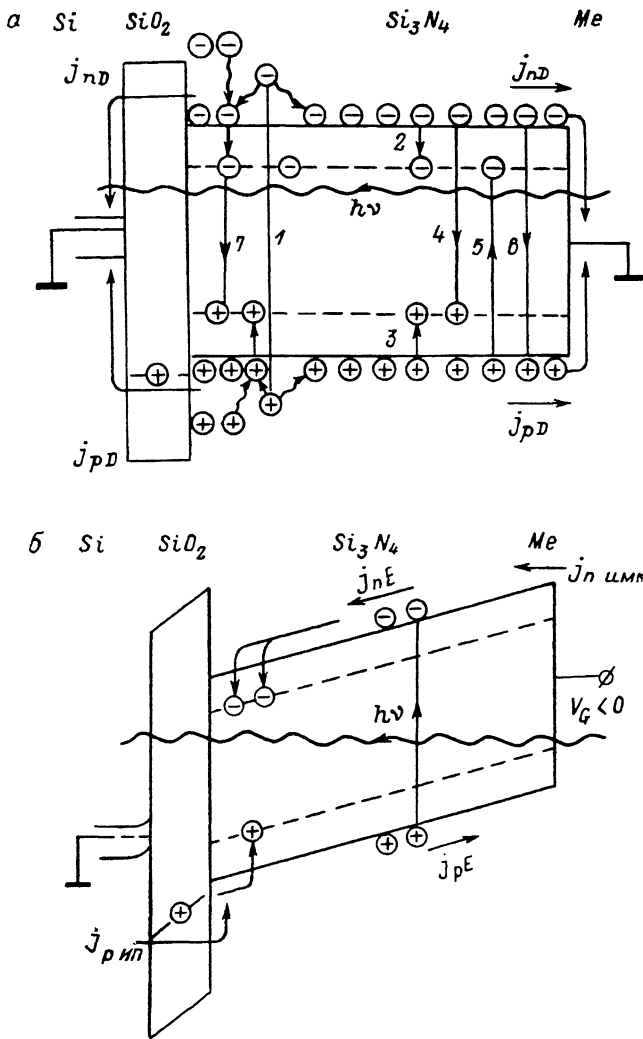


Рис. 1. Зонные диаграммы МНОП структур, поясняющие модель накопления радиационного заряда при облучении МНОП структур (объемный заряд отсутствует при $t=0$).

Внешнее напряжение: а — $V_G=0$, б — $V_G < 0$. 1 — генерация и термализация неравновесных носителей; 2, 3 — захват электронов и дырок на локальные центры; 4, 5 — рекомбинация свободных электронов с захваченными дырками и свободных дырок с захваченными электронами; 6, 7 — рекомбинация свободных электронов и дырок, а также захваченных электронов и дырок. j_{nD} , j_{pD} , j_{nE} , j_{pE} — диффузионная (D) и дрейфовая (E) компоненты электронного (n) и дырочного (p) токов; j_{pE} и j_{nE} — инжекционная компонента тока из полупроводника, j_{nEM} — инжекционная электронная компонента тока из металла.

На рис. 1 показаны зонная диаграмма МНОП структуры при облучении и основные процессы, учтенные в модельных расчетах. При расчетах использовалась неравномерная пространственная сетка, сгущающаяся вблизи МФГР. Метод расчета системы уравнений и выбора шага идентичен описанному в [3]. Среднее время расчета типичного варианта составляет 1—1.5 мин. машинного времени ЭВМ БЭСМ-6.

Зависимость количества локализованного в МНОП структурах при облучении заряда от приложенного напряжения V_G представляет собой гораздо более сложную картину, чем соответствующие кривые для МОП структур. Это обусловлено конкуренцией процессов накопления заряда в диэлектрических слоях SiO_2 и Si_3N_4 , которые заметно различаются по многим характеристикам. Отметим наиболее существенные из них для данной задачи. Важной чертой двуокиси кремния являются очень малая подвижность дырок ($\mu_p \approx \approx 10^{-5} \mu_n$), высокая концентрация дырочных центров захвата при относительно низком сечении захвата $\sigma_{ip} \approx 10^{-(15 \pm 1)} \text{ см}^2$, отсутствие либо малое количество электронных ловушек ($N_{in} \ll N_{ip}$) [4]. Поэтому в МОП структурах при облучении в большинстве случаев имеет место монотонное накопление положительного заряда независимо от знака напряжения V_G .

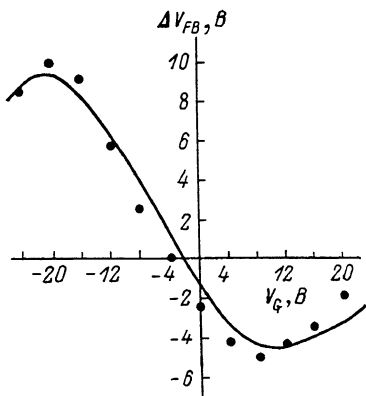


Рис. 2. Зависимость изменения напряжения плоских зон ΔV_{FB} от напряжения на затворе V_G при облучении МНОП структуры с поглощенной нитридом кремния дозой $D_n=10$ Мрад, $d_N=3$ нм, $d_{ox}=100$ нм.

Точки — эксперимент, сплошная линия — расчет. Параметры расчета: $N_{ip}^{ox} = \text{const} = 1.8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{ip}^N = N_{in}^N = 4.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $E_{ip} = E_{in} = 1.25 \text{ эВ}$; $N_{in}^{ox} = 0$; $\mu_n^N = \mu_p^N = 10 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\sigma_{ip}^{ox} = 10^{-14} \text{ см}^2$; $\sigma_{ip}^N = \sigma_{in}^N = 5 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$; $\sigma_p^N = 10^{-15} \text{ см}^2$.

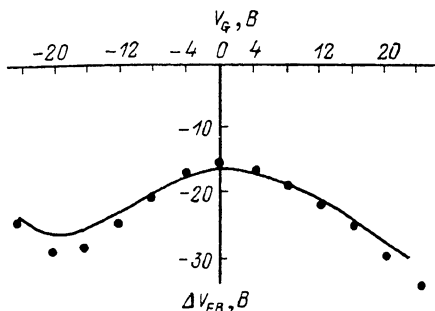


Рис. 3. Зависимость изменения напряжения плоских зон ΔV_{FB} от напряжения на затворе V_G при облучении МНОП структур с поглощенной дозой $D_n=10$ Мрад, $d_{ox}=46$ нм, $d_N=100$ нм.

Точки — эксперимент, сплошная линия — расчет. Параметры расчета: $N_{ip}^{ox} = (1+3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{ip}^N = N_{in}^N = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $E_{ip} = E_{in} = 1.35 \text{ эВ}$; $\mu_n^N = \mu_p^N = 10 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_p^{ox} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_n^{ox} = 20 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

В противоположность этому нитрид кремния характеризуется высокой концентрацией ловушек обоих типов с близкими параметрами ($N_{in} \approx N_{ip}$, $E_{in} \approx E_{ip}$, $\sigma_{ip} \approx \sigma_{in}$), сравнительно близкими значениями подвижностей электронов и дырок [5]. Легко сделать вывод, что для Si_3N_4 , в котором равны параметры носителей и ловушек, в слабых полях, когда характерное время захвата меньше времени пролета через диэлектрик, накопления заряда не происходит. Заметное изменение напряжения плоских зон ΔV_{FB} возникает лишь в достаточно сильном поле, когда происходят пространственное разделение носителей и, как следствие, их локализация у противоположных контактов. Кинетика и стационарные характеристики накопления РИЗ МНОП структур существенно зависят от соотношения толщин диэлектрических слоев, т. е. от величины захваченного в SiO_2 и Si_3N_4 заряда, что хорошо иллюстрируется экспериментальными зависимостями $\Delta V_{FB}(V_G)$ для различных типов МНОП структур [1, 6].

На рис. 2 проведены экспериментальная и расчетная зависимости изменения напряжения плоских зон ΔV_{FB} от напряжения на затворе V_G для МНОП струк-

туры с туннельно-прозрачным слоем двуокиси кремния. В приведенной зависимости $\Delta V_{FB}(V_G)$ наиболее наглядно проявляется влияние пленки двуокиси кремния, связанное не с накоплением в SiO_2 локализованного заряда, а с асимметрией потенциальных барьеров на границе $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}_3\text{N}_4$ для электронов и дырок. Очевидно, что толщины SiO_2 $d_{\text{ox}}=3$ нм недостаточно для появления в нем захваченных дырок, поскольку d_{ox} здесь сопоставима с длиной туннелирования с ловушек в разрешенные зоны кремния.

Асимметрия барьеров на МФГР $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}_3\text{N}_4$ для дырок и электронов на накопление РИЗ в МНОП структурах влияет по-разному в зависимости от напряжения на затворе. В случае достаточно сильного электрического поля (большие $|V_G|$) для возникновения туннельной инжекции носителей из кремния разные параметры энергетических барьеров для данного процесса приводят к асимметрии по критическим $|V_{G_{\text{max}}}|$, начиная с которых накопление заряда лимитируется эмиссией из кремния.

В слабых полях, когда туннелированием из кремния можно пренебречь, на кинетику накопления оказывает влияние неравенство энергетических

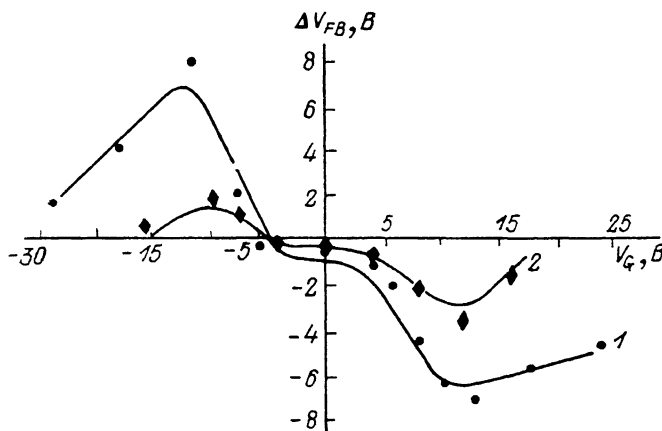


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии 1, 2) зависимости изменения напряжения плоских зон ΔV_{FB} от внешнего напряжения V_G для МНОП структур с оксинитридом кремния при поглощенной дозе $D_n=1$ Мрад.

Параметры расчета: $N_{ip}^N = 5.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{in}^N = 5.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{ip}^{ON} = N_{ip}^N$; $N_{in}^{ON} \approx N_{in}^N$; $E_t^{ON} = E_t^N$.

барьеров для туннельного выброса с центров захвата в нитриде кремния на границе $\text{SiO}_2-\text{Si}_3\text{N}_4$ в зону проводимости и валентную зону Si. Из рис. 1, а видно, что туннельный уход дырок с ловушек в кремний затрудняется по сравнению с электронами, вследствие чего вблизи МФГР $\text{SiO}_2-\text{Si}_3\text{N}_4$ накапливается избыток дырок. Присутствие дырочного заряда, появление которого связано с данным эффектом, и служит причиной смещения точки $\Delta V_{FB}=0$ в область $V_G < 0$ и отличия от нуля значения $\Delta V_{FB} > 0$ при напряжении $V_G=0$.

Увеличение поля обуславливает разделение носителей, их локализацию у противоположных контактов (рис. 1, б) и, как следствие, рост напряжения V_{FB} . При еще больших смещениях проводимость приобретает контактно-ограниченный характер: скорость появления электронов (или дырок) за счет туннелирования из кремния становится сравнимой со скоростью генерации или превышает ее. В таких условиях возникающий избыток захваченных носителей быстро компенсируется инжекцией из кремния заряда противоположного знака. На зависимости $\Delta V_{FB}(V_G)$ это проявляется в уменьшении сдвига напряжения плоских зон с ростом поля. Характерная N-образная зависимость $\Delta V_{FB}(V_G)$ при облучении МНОП структур с туннельно-прозрачным окислом приведена на рис. 2. Параметры модели, при которых достигнуто удовлетворительное согласие с экспериментом, полученные после проведения серии подгоночных расчетов, приведены в подписи к рис. 2.

Для МНОП структур с толстым слоем двуокиси кремния ($d_{\text{ox}}=46$ нм) экспериментальные и расчетные зависимости $\Delta V_{FB}(V_G)$, имеющие U-образный

вид, приведенные на рис. 3. Расчеты показали, что для МНОП элементов с $d_{ox} = 46$ нм накопление и релаксация заряда определяются практически только параметрами пленки SiO_2 . Процессы на МФГР $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$ и в объеме Si_3N_4 заметного влияния не оказывают. Поэтому с использованием подхода, изложенного в [3], было достигнуто удовлетворительное согласие расчетных данных с экспериментом для параметров, приведенных в подписях к рис. 3.

Несколько иная ситуация возникает в случае, если в качестве внутреннего слоя в МНОП структурах вместо двуокиси кремния используется оксинитрид кремния SiN_xO_y . Слой оксинитрида по параметрам центров близки к слоям нитрида кремния, а по ширине запрещенной зоны — к слоям двуокиси кремния [7]. На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные зависимости изменения напряжения плоских зон ΔV_{FB} от внешнего напряжения V_G . Математическое моделирование накопления РИЗ в МНОП структуре позволило установить, что присутствие дополнительного слоя оксинитрида между Si и Si_3N_4 не оказывает существенного влияния на РИЗ, поскольку в оксинитриде, как и в нитриде, наряду с дырочными ловушками имеются ловушки для электронов. Наличие слоя SiN_xO_y привело лишь к некоторому изменению энергетических барьеров на границе $\text{Si—SiN}_x\text{O}_y\text{—Si}_3\text{N}_4$ и, следовательно, к изменению величин туннельных токов из кремния в диэлектрик. Как отмечалось выше, природа этих кривых $\Delta V_{FB}(V_G)$ достаточно проста. При $V_G = 0$ или в полях, недостаточных для разделения носителей, все генерированные частицы либо рекомбинируют, либо электрически компенсируют друг друга. Поэтому в диапазоне $|V_G| < |V_G^*|$ сдвиг потенциала плоских зон незначителен. Затем, как и в случае МНОП структур с туннельно-прозрачным окислом, имеется доминирующая область разделения и инжекции из контактов. В подписях к рис. 4 указаны параметры модели, использованные при расчете.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Немонотонная зависимость изменения напряжения плоских зон ΔV_{FB} приложенного напряжения V_G при облучении МНОП структур обусловлена конкуренцией трех механизмов образования РИЗ — накопления РИЗ в слое двуокиси кремния, разделения носителей в нитриде кремния и инжекции их из кремния. Вариация толщины слоя двуокиси кремния существенно меняет соотношения между этими компонентами и обуславливает или N -, или U -образный характер зависимости $\Delta V_{FB}(V_G)$.

2. Зарядовое состояние со значением $\Delta V_{FB} \approx 0$ для МНОП структур с туннельно-прозрачным слоем SiO_2 реализуется несколькими способами. При малых значениях $V_G < 0$ это связано с компенсацией дырочного РИЗ вблизи МФГР $\text{SiO}_2\text{—Si}_3\text{N}_4$ за счет электронного заряда при разделении носителей в нитриде кремния. При больших значениях $|V_G|$ это связано с компенсацией заряда за счет разделения носителей в нитриде кремния их инжекцией из кремниевой подложки.

В заключение авторы выражают благодарность О. Н. Ивашенкову и А. И. Назарову за предоставление экспериментальных зависимостей.

Список литературы

- [1] Гуртов В. А., Назаров А. И., Степанов В. Е. // Радиотехн. и электрон. 1987. Т. 32. В. 7. С. 1499—1504.
- [2] Гуртов В. А. Радиационные процессы в структурах металл—диэлектрик—полупроводник. Петрозаводск, 1988. 102 с.
- [3] Гуртов В. А., Назаров А. И., Травков И. В. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 6. С. 969—977.
- [4] Барабан А. П., Булавинов В. В., Коноров П. П. Электроника слоев SiO_2 на кремнии. Л., 1988. 303 с.
- [5] Нитрид кремния в электронике / Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск, 1982. 200 с.
- [6] Гуртов В. А., Назаров А. И., Урицкий В. Я. // Радиотехн. и электрон. 1986. Т. 31. В. 9. С. 1881—1883.
- [7] Брытов А. А., Гриценко В. А., Костиков Ю. П. // Препринт ИФП СО АН СССР. Новосибирск, 1985. № 5-85.