

# Оценка эффективности введения пористого слоя в подложку структур кремний-на-сапфире для повышения надежности приборов при облучении

© П.А. Александров, Е.К. Баранова, В.В. Бударягин

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123098 Москва, Россия

E-mail: Alexandrov\_PA@nrcki.ru

(Получена 23 декабря 2015 г. Принята к печати 11 января 2016 г.)

Рассмотрена эффективность введения пористого слоя, создаваемого в подложке структуры кремний-на-сапфире методом ионной имплантации ионов He с целью повышения радиационной стойкости приборов. Проведен анализ свойств введенного слоя и его параметров, влияющих на снижение концентрации генерируемых облучением неосновных носителей заряда. Представленные результаты аналитического анализа и расчетов могут быть использованы для оптимизации режимов имплантации ионов He при создании пористого слоя.

## 1. Введение

С уменьшением размеров элементов электронных схем на качественно новый уровень выходит проблема повышения их надежности и радиационной стойкости. При малой толщине поверхностного приборного слоя становится более существенной роль неравновесных носителей заряда, создаваемых облучением, не в самом приборном слое, а в подложке. Неравновесные носители, генерируемые при облучении, в результате последующей диффузии захватываются на границе раздела рабочего слоя и подложки, образуют наведенный заряд, который создает дополнительное электрическое поле [1]. Высвобождение носителей, например при повышении температуры, способствует росту токов утечки. Все эти факторы приводят к ухудшению характеристик приборов и преждевременному выходу их из строя.

На рис. 1 схематически представлено образование наведенного заряда в структурах кремний-на-сапфире (КНС) для *n*- и *p*-канальных МОП транзисторов (металл-оксид-полупроводник) в результате облучения [1].

При проникающем ( $\gamma$ - или нейтронном) облучении КНС структур генерация неравновесных носителей происходит равномерно по всему объему, однако основная

их часть оказывается сосредоточена не в тонком приборном слое, а в значительно более толстой сапфировой подложке. Поэтому создаваемый под поверхностью некоторый „буферный“ слой может препятствовать диффузии носителей из подложки и накоплению заряда на границе приборного слоя. Кроме того, рекомбинация в таком слое будет способствовать оттоку и удалению носителей из области подложки, непосредственно под приборным слоем.

Известные из литературы примеры создания подобных слоев подтверждают возможность и эффективность их использования для значительного уменьшения концентрации неравновесных носителей и повышения радиационной стойкости приборов. Вместе с тем практическая реализация подобного подхода при создании приборов, работающих в широком диапазоне температур, существенно ограничена термической стабильностью создаваемых слоев.

В данной работе рассматриваются свойства пористого слоя, создаваемого под поверхностью методом ионной имплантации инертного газа, и его влияние на концентрацию неравновесных носителей заряда в области под приборным слоем при проникающем облучении ( $\gamma$ , *n*) КНС структур.

## 2. Свойства имплантационного пористого слоя

В работе [2] был предложен перспективный метод создания под поверхностью „буферного“ слоя путем имплантации ионов инертного газа (He). Имплантация легких ионов в структуры КНС при сравнительно невысоких дозах позволяет получать слой пор в подложке  $Al_2O_3$  на глубине, задаваемой энергией имплантации, практически не разрушая поверхностный рабочий слой Si. Последующая термообработка, помимо восстановления имплантационных повреждений, приводит к формированию температурно-стабильного пористого слоя.

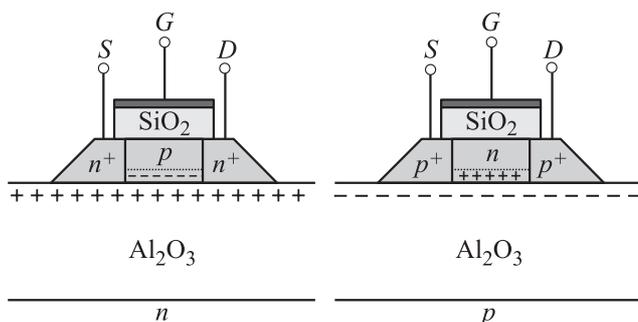


Рис. 1. Образование наведенного заряда в *n*- и *p*-канальных МОП транзисторах. *S* — исток, *G* — затвор, *D* — сток.

В работе [3] показано, что поры, образуемые гелием, обладают термической устойчивостью вплоть до 1650–1850 К, что очень важно для последующего технологического процесса изготовления приборов и схем.

Процессы захвата и рекомбинации носителей на поверхности, в том числе на поверхностях пор, определяются поверхностными состояниями, обусловленными дефектами решетки, которые являются центрами рекомбинации (или ловушками) для электронов и дырок. На тех поверхностях, где существует много поверхностных состояний, рекомбинация носителей происходит интенсивнее и пропорциональна площади поверхности. Удаление генерированных облучением неравновесных носителей заряда в слое пор определяется общей площадью их внутренних поверхностей. Здесь ситуация близка к случаю создания геттерного слоя — технологического метода в изготовлении полупроводниковых приборов, когда введение шероховатой поверхности (увеличение ее площади) увеличивает ее рекомбинационные свойства и является эффективным, в частности, для повышения радиационной стойкости приборов [4].

В рассматриваемом случае дефектный слой, содержащий поры, имеет площадь рекомбинационной поверхности, равную сумме площадей внутренних поверхностей пор. Средний диаметр пор в условиях имплантации (энергия ионов  $E = 70$  кэВ, доза  $D = 3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) составляет  $\sim 50$  Å [2].

Формирование пористого слоя связано с малым коэффициентом диффузии He в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, т.е. можно считать, что весь имплантированный He в этом процессе остается в пределах своего имплантационного профиля распределения. В работе [5] теоретически рассмотрен процесс образования блистеров в результате имплантации ионов He и получено аналитическое выражение для давления газа He в полости блистера.

Согласно этой формуле, плотность атомов He в полости блистера есть

$$N = m/V,$$

где  $m$  — число атомов He,  $V$  — объем полости.

Плотность  $N$  связана с давлением  $P$ , удерживающим гелий в полости, соотношением

$$P = (\alpha Aq/6)N^{1+\alpha/3},$$

где  $\alpha = 5$ ,  $A = 2.65$  эВ · Å<sup>5</sup> — константы потенциала  $U(R)$  взаимодействия двух атомов гелия,

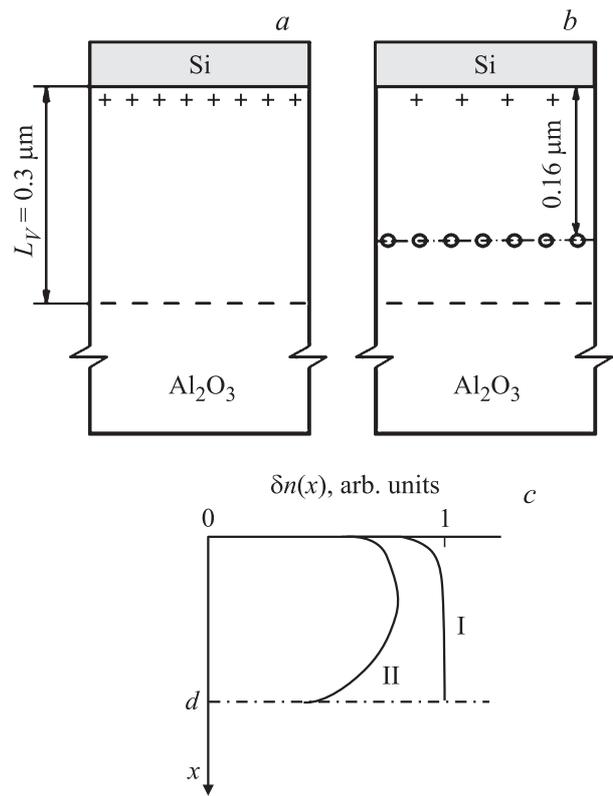
$$U = A/R^5,$$

где  $R$  — расстояние между атомами He [6].

Полагаем, что максимально возможное давление в полости равно пределу прочности Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Если за предел прочности взять величину твердости по Виккерсу 20 ГПа [6], то

$$N = 4.8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Используя полученное значение плотности атомов He в полости (в нашем случае в поре), составляющее  $4.8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , можно оценить суммарную площадь



**Рис. 2.** Схематическое изображение структуры кремний-на-сапфире: *a* — до введения пористого слоя; *b* — после введения пористого слоя; *c* — относительная концентрация носителей заряда (дырок).  $x = 0$  — граница раздела приборный слой/подложка,  $x = d$  — граница раздела Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/пористый слой. I — распределение концентрации неравновесных носителей  $n(x)$  до введения пористого слоя, II — после введения пористого слоя; уменьшение площади под кривой II — обеднение носителями зарядов областей вблизи поверхностей рекомбинации  $x = 0$  и  $x = d$ .

внутренних поверхностей пористой области, играющую роль рекомбинационной поверхности. Она превышает площадь гладкой поверхности в 7 раз. Этот результат дает основание полагать, что, подбирая режимы имплантации для увеличения объема пористого слоя, можно достигнуть лучших результатов.

В объеме Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до облучения присутствуют только объемные (ростовые) дефекты, которые служат центрами рекомбинации. Так как сбор заряда к границе раздела происходит с глубины, равной диффузионной длине носителей, то до введения пористого слоя границы раздела достигнут только неравновесные носители заряда с расстояния, равного диффузионной длине в объеме

$$L_V = \sqrt{D_V t_V},$$

где  $D_V$  — коэффициент диффузии дырок в объеме подложки ( $\sim 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с),  $t_V$  — время жизни носителей ( $\sim 10^{-7}$  с). Оценка  $L_V$  дает  $\sim 0.3$  мкм.

На рис. 2 схематически представлено изменение объемов, с которых собирается заряд на границе приборный

слой/подложка до (рис. 2, *a*) и после (рис. 2, *b*) введения пористого слоя. Рис. 2, *c* качественно иллюстрирует распределение генерированных облучением неравновесных носителей заряда до и после введения пористого слоя (кривая I — в области без пористого слоя, кривая II — при наличии пористого слоя).

Таким образом, введение пористого слоя не только создает дополнительные центры рекомбинации, но и уменьшает расстояние (объем), с которого происходит сбор заряда на границе раздела Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и таким образом уменьшает величину заряда, собранного на этой границе раздела, а именно вместо объема, показанного на рис. 2, *a*, „поставщиком“ неравновесных носителей заряда окажется значительно меньший объем (см. рис. 2, *b*).

### 3. Зависимость концентрации неравновесных носителей от скорости рекомбинации на границе пористого слоя

Для расчета использовалась известная модель рекомбинации [7] на полупроводниковой пластине при возбуждении светом и равномерной по объему генерации носителей с учетом их рекомбинации на двух поверхностях и в объеме. В результате, создаваемые носители диффундируют к границам и захватываются на них.

Основные условия этой модели предполагают невысокие уровни облучения, стационарное облучение, однородное возбуждение (генерация носителей) и практически выполняются, например, при однородном  $\gamma$ - или электронном (при энергии выше  $\sim 100$  кэВ) облучении.

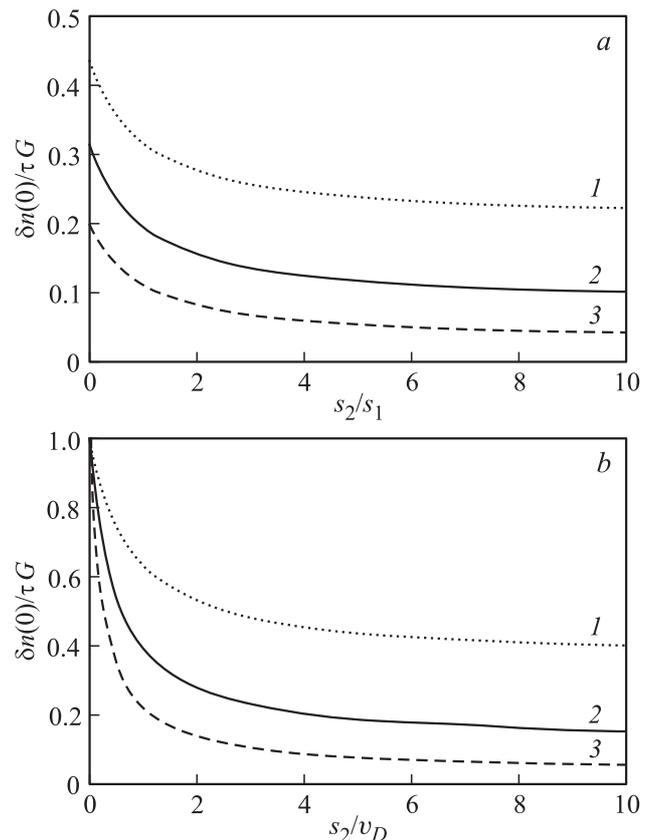
В рамках этой модели [7] было получено общее выражение для распределения концентрации избыточных носителей по глубине  $\delta n(x)$  с учетом их времени жизни и скоростей диффузии и рекомбинации на двух границах раздела:

$$\delta n(x) = G\tau \left| 1 - A' \exp\left(-\frac{x}{L}\right) - B' \exp\left(\frac{x}{L}\right) \right|,$$

где  $G$  и  $\tau$  — скорость генерации и (эффективное) время жизни носителей соответственно,  $L = \sqrt{D\tau}$  — диффузионная длина,  $D$  — коэффициент диффузии. Коэффициенты  $A'$  и  $B'$  определяются из граничных условий в аналитическом виде, но при наличии двух границ раздела характеризуются довольно сложной зависимостью от диффузионной скорости  $v_D = L/\tau$ , величин скоростей поверхностной рекомбинации  $s_1$  и  $s_2$  на этих границах, а также от расстояния  $d$  между ними.

Проведенные в [7] оценки для предельных случаев показывают, что рекомбинация носителей может приводить к существенному обеднению слоя на расстояниях порядка диффузионной длины от поверхности.

Для оценки деталей подобного эффекта при наличии под поверхностью второй границы рекомбинации,

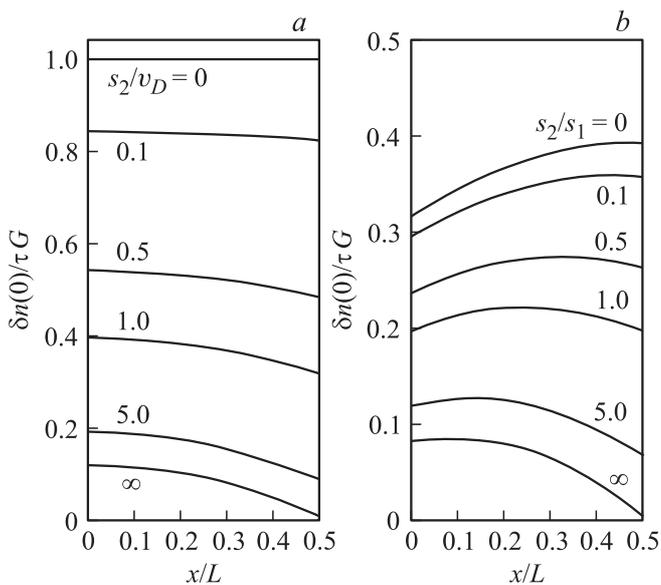


**Рис. 3.** Зависимость относительной концентрации неравновесных носителей на верхней границе  $\delta n(0)/\tau G$  от скорости рекомбинации на нижней границе  $s_2$ , при различной глубине залегания рекомбинационного слоя: 1 —  $d = L$ , 2 —  $d = L/2$ , 3 —  $d = L/4$  ( $L$  — диффузионная длина).  $s_1 = v_D$  (а) и  $s_1 = 0$  (б);  $L = 0.3$  мкм;  $\tau = 10^{-7}$  с.

образуемой слоем пор после имплантации ионов He, в данной работе были проведены дополнительные численные расчеты. Помимо указанных общих модельных ограничений предполагалось, что скорость рекомбинации на поверхностях пор сопоставима со скоростью рекомбинации на свободной поверхности. Такое допущение позволяет рассматривать в качестве параметров не абсолютные, а относительные значения скоростей рекомбинации — пропорционально увеличению общей площади поверхности пор по отношению к площади ровной поверхности. Разброс абсолютных значений в реальном материале может достигать нескольких порядков, в частности в германии от 50 до  $10^5$  см<sup>2</sup>/с и более [7].

Проводимые в данной работе расчеты ориентированы в первую очередь на выявление качественных закономерностей при изменении задаваемой энергией облучения глубины имплантации ( $\sim L$ ) и при возможном диапазоне изменения скоростей рекомбинации от 0 до  $v_D$ . Далее представлены полученные результаты и их анализ.

Концентрация неравновесных носителей на верхней границе (Si/сапфир) всегда  $n(x = 0) < 1$  при наличии



**Рис. 4.** Распределение неравновесных носителей заряда  $\delta n(x)/\tau G$  при различных соотношениях скорости рекомбинации  $s_1$  и  $s_2$  на верхней и нижней границах (слоя пор на глубине  $x = L/2$ ,  $L$  — длина диффузии) соответственно. *a* —  $s_1 = 0$ , *b* —  $s_1 = v_D$ .

на ней рекомбинации и уменьшается с приближением внутренней границы рекомбинации (пористого слоя) к поверхности (рис. 3, *a*) (предполагается, что носители, генерируемые в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ниже пористого слоя, полностью захватываются в нем и не проникают к верхней границе раздела). При скорости рекомбинации на верхней границе  $s_1 = v_D$  [7] на ней выживает не более половины генерируемых носителей, даже в отсутствие рекомбинации на нижней границе. С приближением внутренней границы на расстояние, равное четверти диффузионной длины ( $d = L/4$ ), на верхней границе остается лишь  $\sim 20\%$  неравновесных носителей.

Число неравновесных носителей начинает резко уменьшаться с возникновением рекомбинации и ростом ее скорости на нижней границе (относительной скорости  $s_2/s_1$ ). Однако наибольшее уменьшение (более чем в 2 раза) наблюдается только до  $s_2 < (2-3)s_1$ , большее увеличение  $s_2$  проявляется весьма слабо. Значительно более существенно проявляется влияние нижней границы при отсутствии рекомбинации на верхней границе (рис. 3, *b*). В этом случае концентрация неравновесных носителей на верхней границе уменьшается примерно на 70%.

Профили распределения носителей по глубине представлены на рис. 4. Несмотря на то что они, вероятно, представляют больший интерес с модельной, чем с практической точки зрения, следует отметить „сглаживание“ пика концентрации не только при  $s_1 = 0$ , но и по мере приближения внутренней (нижней) границы к поверхности, т.е. происходит не просто удаление неравновесных носителей („обеднение“) вблизи границ,

но и существенное уменьшение уровня их концентрации по толщине всего слоя.

#### 4. Заключение

В итоге можно сформулировать вывод, что выбранный технологический прием очевидным образом приводит к положительным результатам, так как создает следующие условия:

- введение дополнительной поверхности рекомбинации (пористый слой) с площадью, превышающей площадь гладкой поверхности в 7 раз;
- уменьшение объема, с которого происходит сбор диффундирующих положительных зарядов к границам раздела;
- уменьшение концентрации генерированных облучением носителей между границами раздела (приборный  $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и лежащей ниже  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /пористый слой);
- возможность создания „столикообразного“ профиля распределения путем имплантации с изменением энергии ионов. Не в одном опыте открывает возможность регулировать рекомбинационные возможности введенного слоя;

— приближение нового рекомбинационного слоя к приборному снижает концентрацию неравновесных носителей под приборным слоем; при этом необходимо помнить о реально существующем пределе сближения этих границ, ограничиваемом влиянием таких факторов, как распределение пробегов ионов и радиационных дефектов, и этот вопрос требует дополнительного исследования и практической проверки на опыте.

Все указанные эффекты приводят к снижению количества накопленного заряда и соответственно к меньшей деградации характеристик приборов в условиях облучения — повышению радиационной стойкости аппаратуры.

Таким образом, на основе модельных представлений, развитых в [7], проведено аналитическое исследование параметров, характеризующих рекомбинационные свойства введенного слоя, его расположения в подложке с целью выбора оптимального режима имплантации для уменьшения концентрации неравновесных носителей заряда, генерированных облучением, для увеличения радиационной стойкости приборов, созданных на структурах КНС. Проведенный численный расчет в рамках этой модели позволит ставить целенаправленный эксперимент по выбору режимов создания рекомбинационного захороненного слоя.

Следует заметить, что в настоящее время в литературе встречаются работы, направленные на изменения свойств подложек, изолирующих слоев, приводящих к увеличению радиационной стойкости интегральных схем, приборов.

Сложность создания рекомбинационного слоя с большей площадью суммарной внутренней поверхности пор не отменяет обоснованности постановки данной работы, но требует проведения дополнительных исследований для получения электрофизических параметров этого

материала до облучения, в процессе и после, а также результатов влияния на эти параметры введения слоя в подложку для оптимизации режимов имплантации и отжига.

## Список литературы

- [1] R.A. Kjar, J. Peel. IEEE NS, **21** (6), 8 (1974).
- [2] П.А. Александров, Н.Е. Белова, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов. ФТП, **49** (9), 1124 (2015).
- [3] M.A. Huis, A. van Veen, F. Labohm, A.V. Fedorov, A. Schut, B.I. Kooi, I.Th.M. De Hosson. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **216** (1), 149 (2004).
- [4] В.К. Киселев, С.В. Оболенский, В.Д. Скупов. ЖТФ, **69** (6), 129 (1999).
- [5] Yu.V. Martynenko. Rad. Eff., **45** (1), 93 (1979).
- [6] В.К. Капышев, В.В. Старых. ДАН СССР, **230** (4), 830 (1976).
- [7] П.С. Киреев. *Физика полупроводников* (М., Высш. шк., 1969) гл. 6, с. 476.

*Редактор Л.В. Шаронова*

## Evaluation of efficiency of porous layer introduction into the SOS substrate to improve the reliability of devices by irradiation

*P.A. Aleksandrov, E.K. Baranova, V.V. Budaragin*

National Research Centre „Kurchatov Institute“,  
123098 Moscow, Russia

**Abstract** The paper considers the efficiency of introduction of a porous layer created in the substrate of SOS (silicon-on-sapphire) structures by ion implantation to increase the radiation resistance of a device. The analysis of the properties of these layers and their parameters affecting the reduction of the concentration of radiation generated carriers was performed. The presented analysis and calculation results can be used for optimization of the ion implantation parameters to create a porous layer.