

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ЗАРЯДА ДИЭЛЕКТРИКА НА ЕГО ЭЛЕКТРОННУЮ ПРОВОДИМОСТЬ В МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ С НЕОДНОРОДНОЙ БЛОКИРУЮЩЕЙ ГРАНИЦЕЙ

Г. В. Перов

Представлены результаты исследований влияния положительного подвижного заряда на электронную проводимость окисла на поликристаллическом кремнии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Влияние отрицательного заряда электронов на ловушках плёнки окисла на поликристаллическом кремнии (ОПк) на её проводимость подробно рассмотрено в работах [1, 2]. Это влияние заключается в экранировании этим зарядом внешнего электрического поля и сопровождается снижением проводимости окисного слоя. Однако до последнего времени отсутствуют данные о влиянии подвижного ионного заряда на электропроводность диэлектрических плёнок с неоднородной блокирующей границей. В настоящей статье представлены результаты исследований этого вопроса.

2. МЕТОДИКА

Для исследования использовался комплекс методик, включающий измерения ВАХ образцов при комнатной температуре, токов ТСП/ТСД тестовых структур в диапазоне температур 30–300°C. Проводимость диэлектрического слоя оценивалась по величине электрического поля пробоя $E_{пр}$, соответствующего плотности тока через структуру 10^{-6} А/см². Общая плотность подвижных ионов $N_{пз}$ в окисле определялась по площади кривых ТТСП/ТТСД.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерения проводились на серии образцов, изготовленных термическим окислением поликристаллического кремния (ОПк).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Присутствие ионов в ОПк вызывает смещение ВАХ диэлектрика в область меньших электрических полей в широком диапазоне плотностей токов от 10^{-6} А/см² до 10^{-10} А/см² и изменяет наклон ВАХ

(рис.1). Смещение ВАХ уменьшается от максимального уровня в низковольтной части кривой до минимального уровня в низковольтной части. Так, для пары образцов с плотностью подвижного заряда $4 \cdot 10^{11}$ см⁻² и $4 \cdot 10^{12}$ см⁻² сдвиг ВАХ составляет 1 МВ/см и 0,2 МВ/см при плотностях токов 10^{-10} А/см² ($E < 2$ МВ/см) и 10^{-6} А/см² ($E > 4$ МВ/см) соответственно.

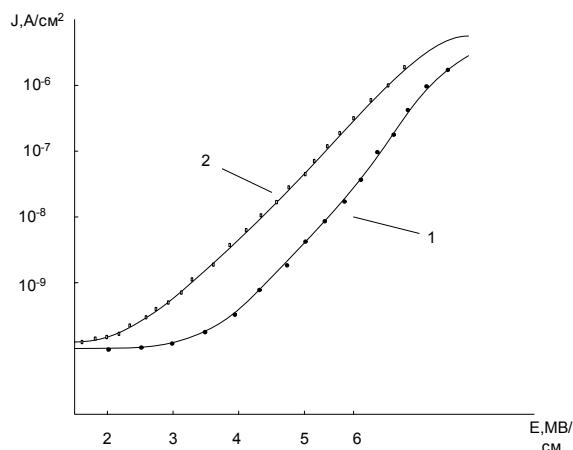


Рис. 1. Вольтамперные характеристики ОПк с различной плотностью подвижного заряда $N_{пз}$ в диэлектрике.

1) $N_{пз} = 1 \cdot 10^{11}$ см⁻²; 2) $N_{пз} = 1 \cdot 10^{12}$ см⁻².

При увеличении содержания ионов $N_{пз}$ в ОПк, электрическая прочность $E_{пр}$ окисной плёнки на Пк монотонно снижается, а проводимость структуры соответственно возрастает (рис. 2). Так, при увеличении содержания ионов в диэлектрике на 2 порядка электрическое поле пробоя ОПк снижается в 1,5 раза.

Изменение формы и положения ВАХ окисла на поликремнии вызваны возникновением в диэлектрике дополнительного внутреннего электрического поля E^+ , направленного вдоль внешнего поля и способствующего росту токов проводимости и уменьшению электрической прочности ОПк [3]. Она вызвана положительным зарядом ионов (рис.3).

Согласно полученным данным, эта компонента проявляется при слабых электрических нагрузках $E < 2$ МВ/см (рис.1).

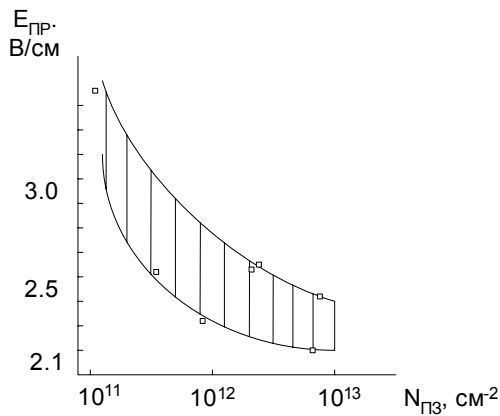


Рис. 2. Взаимосвязь электрического поля пробоя $E_{пр}$ и средней плотности подвижного заряда $N_{пз}$ в ОПк.

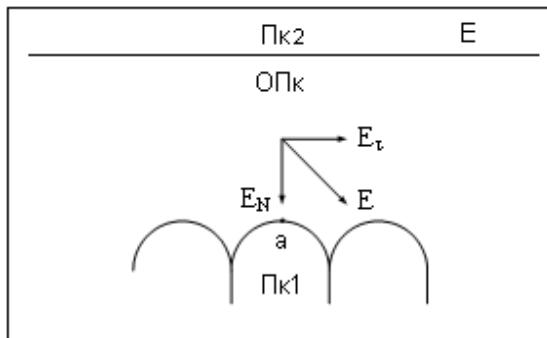


Рис. 3. Распределение электрического поля в ОПк вблизи острий Пк.

Оценим плотность подвижного заряда $N_{пз}$, ответственного за появление E^+ по данным ВАХ (рис.1). Подобно расчёту плотности подвижных ионов по сдвигу ВАХ определение $N_{пз}$ проводилось по сдвигу вольтамперных характеристик $\Delta V_{пз}$ относительно теоретической кривой, соответствующей $N_{пз} = 0$, на выбранном уровне плотности электрического тока:

$$\bar{N}_{пз} = \frac{\bar{Q}_{пз}}{q} = \frac{C_{yo} \Delta V_{пз}}{q} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_o \Delta E}{q} \quad (1)$$

Рассчитаем плотность подвижных ионов в ОПк (1) для плёнки Пк толщиной 50 нм со степенью неоднородности границы $\zeta = 1,1$. В этом случае сдвиг $\Delta E = E^+$ на уровне 10^{-10} А/см² составляет около 1 МВ/см. Соответствующая этому сдвигу плотность $N_{пз}$ равна:

$$\begin{aligned} \bar{N}_{пз} &= \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_o}{q} \cdot E^+ = \\ &= \frac{3,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 10^6 \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \end{aligned} \quad (2)$$

В то же время плотность ионов в этой плёнке, измеренная методом ТТСП, составляет $4 \cdot 10^{12}$ см⁻².

Следовательно, только половина ионов в слое ОПк вносит вклад в изменение внутреннего электрического поля на блокирующей поверхности. Этот результат согласуется с данными расчёта центра тяжести подвижного заряда в окисле на поликремнии, в соответствии с которыми он расположен посередине, и подтверждает

заключение о примерно равном распределении ионов на внутренней и внешней границах раздела. Таким образом, возрастание токов проводимости в низковольтной части ВАХ ОПк вызвано ионным зарядом, размещённым вблизи окисленной поверхности Пк.

Появление дополнительных электронных токов при комнатной температуре, вызванных полем положительных ионов, при измерении ВАХ происходит на фоне перераспределения ионного заряда вдоль неоднородной блокирующей границы. Перераспределение ионов при измерении ВАХ происходит непрерывно в соответствии с картой внутренних электрических полей за время $\tau_{рел}$.

Эффективное время релаксации для окисла кремния $\tau_{рел} = 10^{-5} - 10^{-3}$ сек [4], поэтому время релаксации подвижного ионного заряда в диапазоне слабых электрических полей E_n до 2 МВ/см составляет:

$$\begin{aligned} \tau_{рег} &= \tau_{эфо} \cdot \exp \frac{\varepsilon_a}{K \cdot T} = (10^{-5} \div 10^{-3}) \cdot \\ &\cdot \exp \frac{1,34 - 4,82 \cdot 10^{-4} \sqrt{2 \cdot 10^6}}{0,025} = 1 \div 600 \text{ с} \end{aligned} \quad (3)$$

Время регистрации ВАХ $\tau_{рег}$ окисла толщиной 50 нм при скорости развёртки $V_{рег} = 0,25$ В/с в указанных пределах электрических полей до 2 МВ/см составляет:

$$\tau_{рег} = \frac{\chi_{SiO_2}}{v_{рег}} \cdot E_n = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^6}{0,25} = 4 \text{ с} \quad (4)$$

Сравнение $\tau_{рел}$ и $\tau_{рег}$, оценки $N_{пз}$ по ВАХ и кривым ТТСП показывают, что только часть заряда ионов, для которой $\tau_{рел} < \tau_{рег}$, проявляется в изменении проводимости ОПк.

Изменение рельефа геометрической границы приводит к перераспределению внутреннего электрического поля подвижного заряда ионов. Можно прогнозировать, что при увеличении степени неоднородности границы раздела ОПк–Пк происходит накопление ионов на остриях Пк и возрастание локального электрического поля. Это сопровождается смещением ВАХ в область слабых электрических полей и уменьшением крутизны ВАХ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Присутствие подвижного положительного заряда в ОПк и накопление его вблизи острий поликремния приводит к увеличению локальных электрических полей на блокирующей границе Пк и росту проводимости изолирующего слоя. Электрическое поле, вызванное ионным зарядом, накопленным на остриях поликремния, стимулирует инжекцию электронов из поликремния. По этой причине возможны отказы микросхем на базе многослойных структур МОП в рабочих режимах их эксплуатации.

Влияние заряда подвижных ионов на проводимость окисла с неоднородной геометрической грани-

цей раздела усиливается или ослабляется при увеличении или соответственно уменьшении степени шероховатости блокирующей поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Han Sheng Lee. High electric field generated electron traps in oxide grown from polycrystalline silicon // Appl.Phys.Lett.-1980.-v.37. №12.-p.1080-1082.
2. Groesneken G., Maes H.E. A quantation model for the conduction in oxides thermally grown polycrystalline silicon / IEEE Trans.on El. Dev.-1986.-v.ED-33, №.7-p.1028-1042.
3. Сальман Е. Г., Вертопрахов В.Н., Данилович. В.С. Изучение процессов образования и переноса заряда в слоях двуокиси кремния на кремнии. / ЦИОНТ ПИК.-Деп. в ВИНТИ.: №558-76.-Новосибирск, 1975.-с.21.
4. Salman E.G.,Vertoprakhov V.N. Thermally stimulated depolarisation current controlled by surface charge change // Phys.Stat.Sol. (a).-1988.-v.1008. №2.-p.625-630.

Перов Геннадий Васильевич

к.т.н., доцент, акад. МАС, кафедра САПР Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики; e-mail: mef@ngs.ru.