

ВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНОГО ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЗАРЯДА НА ЭЛЕКТРОННУЮ ПРОВОДИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКА С НЕОДНОРОДНОЙ БЛОКИРУЮЩЕЙ ГРАНИЦЕЙ

Рассматривается влияние заряда подвижных ионов на электронную проводимость диэлектрика с неоднородной блокирующей границей раздела. На основе установленной корреляции между проводимостью и величиной подвижного заряда диэлектрика сформулированы основные положения модели поведения подвижного заряда в окисле на поликристаллическом кремнии (ОПК) с шероховатой блокирующей границей.

Ключевые слова: подвижный заряд диэлектрика, неоднородная блокирующая граница диэлектрика с полупроводником, окисел на поликристаллическом кремнии.

Многослойные компоненты из полупроводниковых, диэлектрических, проводящих слоев являются основой современных микроэлектронных структур. Технология формирования этих слоев постоянно развивается в направлении улучшения воспроизводимости электрических параметров и физико-химических свойств. Одной из базовых технологических задач является управление проводимостью диэлектрических пленок, встраиваемых в активные электронные блоки как на плоской поверхности монокристаллической подложки так и на поверхности зернистых слоев, например, поликристаллического кремния.

Постановка задачи. Проводимость диэлектрических слоев, в том числе на шероховатых поверхностях, достаточно хорошо изучена. Влияние отдельных составляющих заряда на проводимость изолирующих пленок является целью постоянных исследований. Например, влияние отрицательного заряда электронов на ловушках пленки окисла на поликристаллическом кремнии на ее проводимость подробно рассмотрено в работах [1; 2]. Влияние поверхностного заряда заключается в экранировании этим зарядом внешнего электрического поля и сопровождается снижением проводимости окисного слоя. Однако до последнего времени отсутствуют данные о влиянии положительного ионного заряда, подвижного при термодинамических нагрузках на электропроводность диэлектрических пленок с неоднородной блокирующей границей. В настоящей статье представлены результаты исследований этого вопроса.

Методика измерений и подготовка образцов. Для исследования использовался комплекс методик, включающий измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов при комнатной температуре, токов ТСП/ТСД тестовых структур в диапазоне температур 30...300 °С. 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.

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

Результаты и обсуждение. Присутствие ионов в ОПК вызывает смещение ВАХ диэлектрика в область меньших электрических полей в широком диапазоне плотнос-

тей 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.

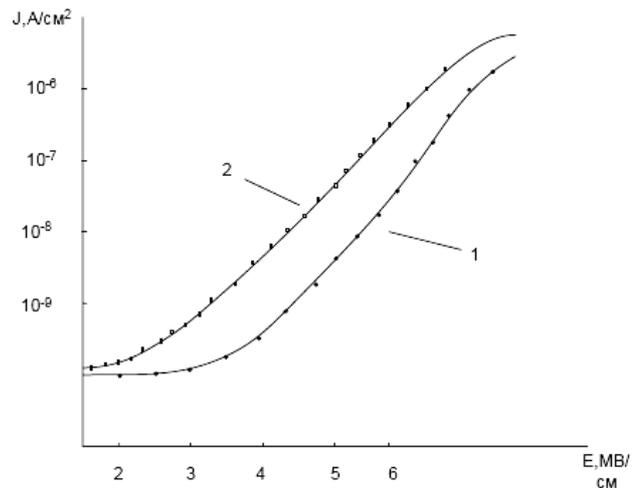


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ОПК с различной плотностью подвижного заряда $N_{пз}$ в диэлектрике:
1 — $N_{пз} = 1 \cdot 10^{11}$ см⁻²; 2 — $N_{пз} = 1 \cdot 10^{12}$ см⁻².

При увеличении содержания ионов $N_{пз}$ в ОПК, электрическая прочность $E_{пр}$ окисной пленки 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).

Оценим плотность подвижного заряда $N_{ПЗ}$, ответственного за появление E^+ по данным ВАХ (рис. 1). Подобно расчету 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:

$$\overline{N_{ПЗ}} = \frac{\overline{Q_{ПЗ}}}{q} = \frac{C_{уд} \Delta V_{ПЗ}}{q} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta E}{q} \quad (1)$$

Рассчитаем плотность подвижных ионов в ОПк (1) для пленки 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

$$\begin{aligned} \overline{N_{ПЗ}} &= \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{q} \cdot E^+ = \\ &= \frac{3,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 10^6 \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}. \end{aligned} \quad (2)$$

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

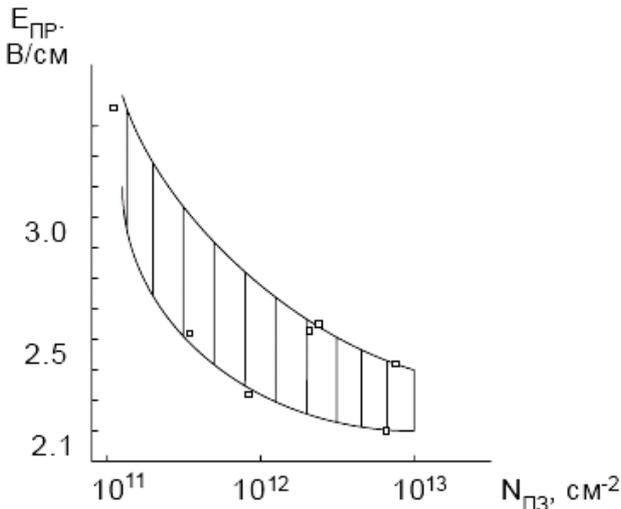


Рис. 2. Взаимосвязь электрического поля пробоя $E_{пр}$ и средней плотности подвижного заряда $N_{ПЗ}$ в ОПк

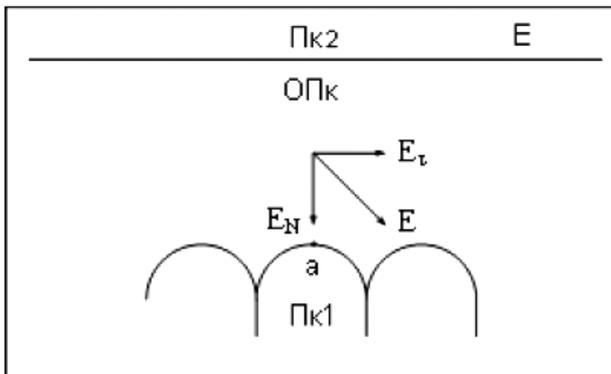


Рис. 3. Распределение электрического поля в ОПк вблизи острий Пк

Следовательно, только половина ионов в слое ОПк вносит вклад в изменение внутреннего электрического поля на блокирующей поверхности. Этот результат согласуется с данными расчета центра тяжести подвижного за-

ряда 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, размещенным 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 $\tau_{рел} = 10^{-5} \dots 10^{-3}$ с [4], поэтому время релаксации подвижного ионного заряда в диапазоне слабых электрических полей E_n до 2 МВ/см составляет

$$\begin{aligned} \tau_{рел} &= \tau_{эф0} \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{K \cdot T}\right) = (10^{-5} \dots 10^{-3}) \times \\ &\times \exp\left(\frac{1,34 - 4,82 \cdot 10^{-4} \sqrt{2 \cdot 10^6}}{0,025}\right) = 1 \dots 600 \text{ с}. \end{aligned} \quad (3)$$

Время регистрации ВАХ $\tau_{рег}$ окисла толщиной 50 нм при скорости развертки $V_{рег} = 0,25$ 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.

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. Влияние заряда подвижных ионов на проводимость окисла с неоднородной геометрической границей раздела усиливается или ослабляется при увеличении или соответственно уменьшении степени шероховатости блокирующей поверхности.

Библиографический список

1. Lee, H. S. High electric field generated electron traps in oxide grown from polycrystalline silicon / H. S. Lee // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 37, № 12. P. 1080–1082.
2. Groesneken, G. A quantation model for the conduction in oxides thermally grown polycrystalline silicon /

G. Groesneken, H. E. Maes // IEEE Trans. on El. Dev. 1986. Vol. ED-33, № 7. P. 1028–1042.

3. Сальман, Е. Г. Изучение процессов образования и переноса заряда в слоях двуоксида кремния на кремнии / Е. Г. Сальман, В. Н. Вертопрахов, В. С. Данилович. ЦИ-

ОНТ ПИК. Деп. в ВИНТИ: № 558-76. Новосибирск, 1975.

4. Salman, E. G. Thermally stimulated depolarisation current controlled by surface charge change / E. G. Salman, V. N. Vertoprakhov // Phys. Stat. Sol. 1988. Vol. 1008, № 2. P. 625–630.

G. V. Perov, V. I. Sedinin

INFLUENCE OF MOBILE POSITIVE CHARGE ON ELECTRONIC CONDUCTIVITY OF DIELECTRIC WITH HETEROGENEOUS BLOCKING BORDER

The correlation between size of the positive mobile charge and electronic conductivity of oxide on polycrystalline silicon is established by the experimental method of thermally stimulated polarization and depolarization of MIS-structures. The boundary conditions of the problem for the working model of mobile charge behavior in isolating layers which were generated on a rough semiconductor film, are formulated.

Keywords: mobile charge of dielectrics, heterogeneous blocking border of dielectrics with a semiconductor, oxide on polycrystalline silicon.

УДК 621.391.037.372

К. М. Волощук, Т. А. Чалкин

ПРОТОКОЛ ПРОЗРАЧНОГО ШИФРОВАНИЯ ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПО КАНАЛУ «ЗЕМЛЯ–БОРТ»

Описан протокол прозрачного шифрования, разработанный для организации сеансов передачи данных по защищенному каналу связи «земля–борт». Протокол определяет место генерации, тестирования и хранения, процедуры выбора, режимы смены ключевой информации при обработке данных.

Ключевые слова: протокол прозрачного шифрования, канал передачи данных «земля–борт», модуль обработки информации.

Задача данной работы – разработать протокол прозрачного шифрования данных, передаваемых по спутниковому каналу связи «земля–борт» в рамках научно-исследовательской работы (НИР).

Актуальность работы обусловлена следующим. Целостность предназначенных для управления космическим аппаратом (КА) разовых команд (РК), а также конфиденциальность транслируемых по каналу «земля–борт» стратегически важных данных обладают высокой степенью критичности. Чтобы гарантировать заданный уровень обеспечения данных свойств защищенности информации, необходима организация защищенного канала передачи данных «земля–борт».

Для организации защищенного канала передачи данных в систему космической связи устанавливаются аппаратные модули обработки информации (МОИ), выполняющие специальную обработку (спецобработку) данных по заданному алгоритму шифрования в режиме, определенном для обработки логической единицы передаваемых данных (кадра). Данные с выхода соответствующей компьютерной системы центра управления полетами (КС ЦУП) поступают на вход МОИ, где происходит их спецобработка. Зашифрованные данные поступают на вход наземной командно-измерительной

станции (КИС), выполняется формирование кадра, модулированный по соответствующему стандарту сигнал конвертируется и передается на наземную приемно-передающую систему (ППС). С ППС ЦУП сигнал транслируется и принимается ППС КА. Затем сигнал поступает в КИС КА, с выхода которой полученные зашифрованные данные передаются в МОИ, расшифровываются и поступают в бортовой компьютер (БК) КА. Передача данных с КА в ЦУП осуществляется аналогичным образом (рис. 1).

Данная криптосистема, обеспечивающая защищенный канал передачи данных «земля–борт», должна отвечать следующим техническим требованиям, обусловленным спецификой канала передачи данных:

1. Шифрование данных должно осуществляться в потоковом режиме с канальной скоростью не менее 32 кбит/с.
2. Автономная работа элементов криптосистемы, установленных на борту КА, в течение всего срока эксплуатации КА.
3. Обработка кадров данных произвольной длины.
4. Устойчивость криптосистемы к современным методам криптоанализа.
5. Криптосистема должна обеспечивать контроль целостности передаваемых данных.