

05; 06; 12

© 1992

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЗАХВАТ ДЫРОК
В КРЕМНИЕВЫХ МОП СТРУКТУРАХ

А.Ф. Акулов, В.В. Афанасьев

В работе исследовался захват дырок на ловушки в структурах металл-окисел-полупроводник (МОП), происходящий в полях напряженностью до $E=6$ МВ/см. Инжекция носителей в диоксид осуществлялась путем их фотогенерации во внешнем слое диэлектрика фотонами с энергией 10 эВ. Для заполнения электронных ловушек и оценки их локализации осуществлялась фотоинжекция электронов из обоих контактов при освещении монохроматическим светом с энергией 4,9 эВ. Измерительная схема позволяла регистрировать протекший, а также захваченный заряд (последний — стандартным методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ)). Исследовались МОП структуры, полученные окислением n -Si в сухом кислороде до различных толщин (d), с полупрозрачным затвором из Ni площадью 0.5 мм^2 .

При приложении к затвору положительного смещения основным результатом облучения является накопление вблизи межфазной границы (МФГ) Si - SiO₂ положительного заряда локализованных дырок. Полевая зависимость отношения плотности захваченных дырок к плотности протекших ($P=Nt/Ni$) значительно изменялась с плотностью инжектированных носителей. Начальная вероятность P_0 ($Ni=(3-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) падает на участке $E=0.8-2.0$ МВ/см (рис. 1, кривые 1, 2) для диоксидов разных толщин, а вне этого участка меняется слабо вплоть до $E=6$ МВ/см. Если увеличить плотность инжектированных носителей на порядок ($Ni=10^{14} \text{ см}^{-2}$), полевая зависимость вероятности захвата примет вид, представленный на рис. 1 кривой 3.

Поскольку вероятность захвата дырки определяется плотностью ловушек, зависимость P от E объясняется в рамках модели накопления дефектов при окислении [1]: чем больше время окисления, а следовательно, и толщина диоксида, тем больше дефектов на МФГ Si - SiO₂, часть из которых является дырочными ловушками [2].

Наблюдающееся уменьшение начальной вероятности захвата в диапазоне $E=0.8-2.0$ МВ/см может быть объяснено, согласно [3], начинающимся в этих полях туннелированием электронов из подложки на захваченную дырку. Наличие высокополевого участка указывает на существование дырочных ловушек в диоксиде, не доступных туннелирующим электронам. Слабая полевая зависимость P_0 в диапазоне ниже 0.8 и выше 2 МВ/см может объясняться наличием диффузных потоков дырок и, при малых полях, экситонов. Вклад

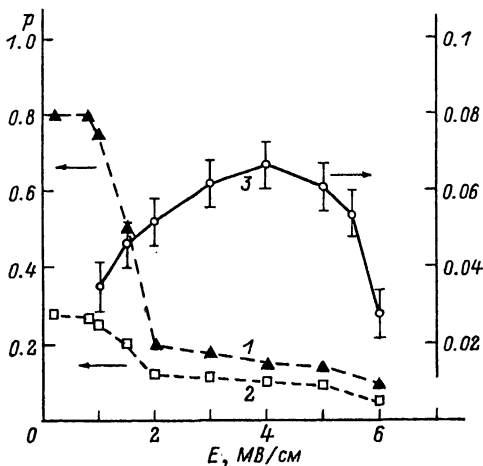


Рис. 1. Зависимость начальной вероятности захвата дырок P от напряженности поля E для МОП структур с SiO_2 толщиной $d = 120$ (1, 3) и $d = 40$ нм (2), после инжекции $N_i = 3 \cdot 10^{12}$ (1, 2) и $N_i = 10^{14}$ (3) дырок/см².

последних подтверждается наличием дырочного захвата на МФГ $Si-SiO_2$ в малых ($E < 0.8$ МВ/см) полях инверсной полярности. Кроме того, полевая зависимость будет ослабляться в тонких диэлектриках, у которых область генерации пар приближается к области локализации дырочных ловушек.

После введения в диоксид значительного числа дырок ($N_i > 10^{14}$ см⁻²) определяющую роль в накоплении заряда начинают играть эффекты рассеивания дрейфующих дырок полем локализованных [4] и вытягивания электронов из подложки суммарным внешним полем и полем захваченных дырок. Локализованная дырка создает отталкивающее поле, затрудняющее последующий захват на близлежащие свободные ловушки. Внешнее поле, взаимодействуя с полем локализованных дырок, ослабляет этот «корреляционный эффект» [4], открывая тем самым ранее не доступные для захвата дырок ловушки, что ведет к увеличению вероятности захвата. Однако при дальнейшем увеличении напряженности внешнего электрического поля преобладающим становится механизм туннелирования электронов из подложки. Проникая в глубь диэлектрика и аннигилируя локализованные дырки, электроны уменьшают область вблизи МФГ $Si-SiO_2$, способную к накоплению положительного заряда.

Увеличение вытягивающего поля для электронов происходит и с ростом плотности локализованных дырок. Поэтому при достижении значения напряженности суммарного поля $E = 6.5-7.0$ МВ/см процессы захвата дырок и их аннигиляции компенсируются. На это указывает прекращение дальнейшего смещения ВФХ при облучении в

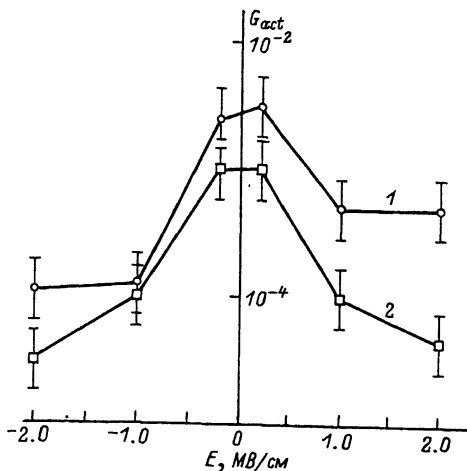


Рис. 2. Зависимость темпа активации G_{act} от напряженности поля E при температуре $T=300$ К (1) и $T=90$ К (2).

случае достижения определенного для каждого образца значения суммы напряжения внешнего смещения и изменения напряжения середины зоны. Одновременно с захватом дырок на МФГ $Si'-SiO_2$ генерируются поверхностные состояния, причем плотность последних близка к плотности захваченных носителей, как наблюдалось и ранее [5]. Полевой зависимости в генерации этих дефектов не наблюдалось.

Помимо захвата дырок вблизи полупроводников наблюдается и захват их на ловушки, локализованные объемно. Пространственная удаленность этих центров от подложки делает невозможным туннелирование на них электронов. Расстояние между ловушками значительно превышает радиус кулоновского экранирования (объемная плотность 10^{16} см^{-3} [6] по сравнению с 10^{19} см^{-3} на МФГ [2]). Захват дырок в объеме приводит к активации электронных центров захвата с нейтральным сечением $(2-6) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ [6]. Темп активации этих ловушек, нормированный на протекший заряд ($G_{act} = dN_{act}/dN_i$), имеет максимум в слабых полях, указывающий на наличие вклада в процесс нейтральных частиц (рис. 2). При нормировке на поглощенный поток фотонов указанная особенность исчезала. Это говорит о том, что генерация нейтральных частиц является комплиментарной по отношению к генерации свободных носителей заряда. Центр оид локализации активируемых центров ($\bar{x} = 150 \text{ нм}$ при $d = 200 \text{ нм}$) соответствует активации ловушек в приповерхностном слое диоксида, а также в объеме SiO_2 .

Активация происходит и при низких ($T=90$ К) температурах. И в этом случае полевая зависимость темпа активации ловушек имеет максимум в области низких полей (рис. 2). Но общий вид ее становится симметричным, т. к. при положительной полярности

затвора вместо транспорта дырок происходит их захват у внешней поверхности диоксида и рекомбинация. Учитывая, что при температуре 90 К как дрейф дырок, так и диффузия ионов водорода в диоксиде „заморожены“, наблюдаемое нарушение объема диэлектрика можно связать только с переносом экситонов.

Вышеизложенное позволяет заключить, что процессы дырочного захвата, происходящего вблизи границы $Si-SiO_2$, лимитируются эффектами туннелирования электронов из подложки на локализованные дырки и рассеяния дрейфующих дырок полем захваченных. В объеме $Si-SiO_2$ при низкой ($\ll 1$ МВ/см) напряженности существенным становится захват дырок, транспортирующихся в составе экситонов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Л и т о в ч е н к о В.Г., Г о р б а н ь А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. Киев, 1978. 315 с.
- [2] А д а м ч у к В.К., А ф а н а с ь е в В.В., А к у л о в А.Ф. // Поверхность. 1988. Т. 12. С. 5-10.
- [3] Р о w e l l R.J. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 10. P. 4557-4563.
- [4] А д а м ч у к В.К., А ф а н а с ь е в В.В. // Поверхность. 1988. Т. 9. С. 147-150.
- [5] У а н к о в а А., D o t h a n h L., В а l k P. // Solid-St. Electron. 1987. V. 30. N 9. P. 939-946.
- [6] А д а м ч у к В.К., А ф а н а с ь е в В.В., А к у л о в А.В. // Phys. Stat. Sol. (a). 1990. N 122. P. 347-353.

Поступило в Редакцию
22 июля 1992 г.