

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕГРАДИРОВАННЫХ
МНОП-СТРУКТУР ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И
ВЛИЯНИЕ СВЕТА НА СКОРОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

А. Ф. Плотников, Р. Г. Сагитов, З. Я. Садыгов,
В. Н. Селезнев

УДК 621.382

Экспериментально показано, что деградированная МНОП-структура является неравновесной системой. Характерное время релаксации составляет $10^6 + 10^7$ с. Освещение He-Ne лазером ускоряет процесс восстановления.

Число допустимых переключений элементов памяти на основе структур металл - нитрид кремния (Si_3N_4) - окисел кремния (SiO_2) - полупроводник (Si) (МНОП-структур) ограничено деградационными явлениями. Отмечается значительное возрастание скорости стекания накапливаемого при поляризации структуры заряда, рост стационарной проводимости структуры /1/.

Деградационные явления в МНОП-структурах могут быть связаны с накоплением скомпенсированного заряда электронов и дырок, захваченных на ловушках Si_3N_4 . Увеличение скорости стекания τ объясняется в рамках этой модели вовлечением в ток разрядки скомпенсированной части заряда /2/. В случае, если накопление скомпенсированного заряда приводит к неравновесности системы, наблюдаемые деградационные явления должны быть обратимыми. Термически возбужденные электроны и дырки могут рекомбинировать или уходить в контакт. Поскольку мы имеем дело с широкозонным диэлектриком (ширина запрещенной зоны Si_3N_4 составляет 5,1 эВ), и заряд захватывается глубокими ловушками ($E_t \approx 1 + 2$ эВ), термическое возбуждение зарядов на ловушках и их последующая рекомбинация могут быть затруднены.

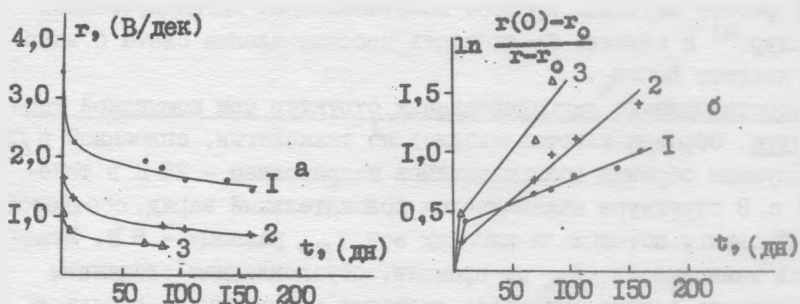
В работе изучался процесс восстановления деградированных структур ^{*}) и влияние на скорость восстановления света с энергией квантов $\hbar\omega \gg E_c$.

Восстановление деградированных структур при комнатной температуре. Образцы изготавливались по технологии, описанной в /3/. Исследуемые образцы поляризовались напряжением - 25 В в течение 1 с. В структуре накапливался положительный заряд, соответствующий сдвигу потенциала плоских зон V_{fb} , равному - 8 В. Изменялась зависимость V_{fb} от времени, обусловленная стеканием накопленного заряда. Скорость стекания накопленного заряда r_0 определялась по наклону кривой $V_{fb} = f(\lg t)$ в диапазоне времени $10^2 + 5 \cdot 10^3$ с и составляла 0,3 В/дек. В указанном диапазоне времени скорость стекания не изменялась. Затем структуры деградировались воздействием серии дупольярных импульсов с амплитудой ± 55 В и длительностью 1 мс. Число импульсов N составляло $5 \cdot 10^4 + 10^6$. Структура в течение времени t хранилась при комнатной температуре, затем опять поляризовалась ($V = -25$ В, $\tau = 1$ с), и измерялась скорость стекания $r(t)$ по описанной выше методике. Измерения повторялись в течение 160 дней.

На рис. 1 показана релаксация скорости стекания для образцов с разной степенью деградации. Характерное время релаксации величины $r(t) - r_0$ обратно пропорционально тангенсу угла наклона кривых на рис. 1б. Кривые были аппроксимированы двумя отрезками прямой. Начальные участки (до 10 дней) характеризуются временем релаксации $\tau_1 \approx 10^6$ с, затем время релаксации увеличивается примерно на порядок и остается постоянным до времен $t \approx 10^7$ с. Время восстановления τ_2 увеличивается с ростом степени деградации.

Некоторые образцы, восстановленные до уровня скорости стекания 0,4 + 0,5 В/дек., вновь были подвергнуты деградации, и затем измерялась релаксация скорости стекания. В пределах ошибок из-

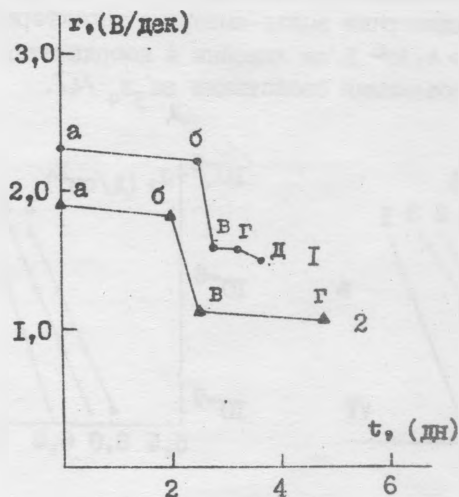
^{*}) В связи с наблюдением в данной работе факта восстановления характеристик структур, общепринятый термин "деградация МНСИ-структур", употребляемый в данной работе, не означает необратимости наблюдаемых явлений.



Р и с. 1. Релаксация скорости стекания (без освещения): а) 1 - $N = 10^6$, 2 - $N = 10^5$, 3 - $N = 5 \cdot 10^4$, б) 1 - $N = 10^6$, $\tau_1 = 20$ дн., $\tau_2 = 80$ дн., 2 - $N = 10^5$, $\tau_1 = 20$ дн., $\tau_2 = 120$ дн., 3 - $N = 5 \cdot 10^4$, $\tau_1 = 10$ дн., $\tau_2 = 220$ дн

мерений они не отличались от исходных (после первой деградации) ни по уровню скорости стекания, ни по временам восстановления. Таким образом, деградационные явления в МНОП-структурах обратимы при комнатной температуре. Отметим, что если режим работы элемента памяти таков, что за 10^7 с произойдет не более 10^5 переключений, то деградация скомпенсируется восстановлением при уровне скорости стекания заряда, мало отличающемся от скорости стекания недеградированной структуры.

Влияние света на скорость восстановления структуры. Измерялась скорость стекания заряда r_0 до деградации. Сразу после деградации и через 2 дня хранения структур в темноте измерялась скорость стекания заряда. По двум точкам (а и б на рис. 2) определялось темновое время восстановления. Затем структуры освещались излучением гелий-неонового лазера ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) в течение 6–8 часов. Излучение лазера фокусировалось на полупрозрачном золотом электроде, площадь которого равнялась $0,1 \text{ см}^2$. Поток фотонов составлял $10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. После выключения света вновь измерялась скорость стекания заряда (точка в). По точкам б и в определялось характерное время восстановления светом $\tau_{\text{ОВ}}$. Затем опять определялось темновое время $\tau_{\text{ВГ}}$. Структура, которой соответствует кривая 1 на рис. 2, повторно освещалась лазером (участок г - д) и определялось характерное время восстановления светом $\tau_{\text{ГД}}$.

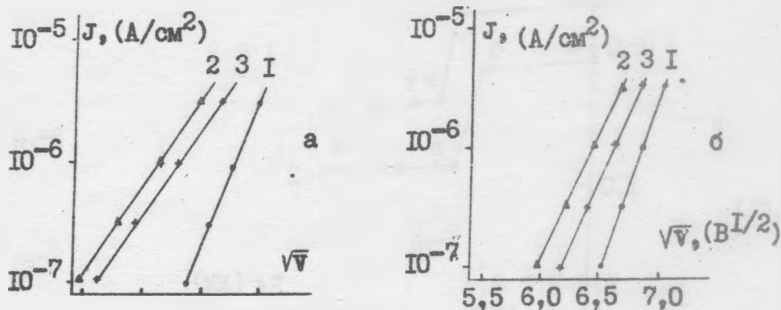


Р и с. 2. Влияние света на релаксацию скорости стекания: 1) $\tau_{\text{аб}} = 40$ дн., $\tau_{\text{об}} = 18$ час, $\tau_{\text{вг}} = 50$ дн., $\tau_{\text{гд}} = 6$ дн., 2) $\tau_{\text{аб}} = 30$ дн., $\tau_{\text{об}} = 24$ час, $\tau_{\text{вг}} = 50$ дн

Из результатов, приведенных на рис. 2 видно, что освещение структуры светом He-Ne лазера с указанной плотностью потока фотонов ускоряет процесс восстановления более чем на порядок. Отметим, что влияние света уменьшается со временем освещения: характерное время восстановления на участке г-д (кривая I) увеличилось почти на порядок по сравнению с $\tau_{\text{об}}$, в то время как темновое время восстановления увеличилось незначительно. При длительном освещении скорость стекания заряда восстанавливалась на $30 + 70\%$.

Оценки показали, что нагрев структуры, вызванный поглощением света, не превышает 0,2 K, то есть ускорение восстановления не связано с увеличением вероятности термического возбуждения электронов и дырок на ловушках. Поскольку энергия квантов света $\hbar\omega \approx 1,95$ эВ сравнима с глубиной ловушек, наблюдаемое восстановление, по-видимому, связано с фотоионизацией ловушек и дальнейшей рекомбинацией носителей тока или уходом их в контакты.

Для некоторых образцов параллельно с измерением релаксации τ измерялась релаксация стационарной проводимости (рис. 3). Известно, что стационарные вольт-амперные характеристики МНОП-структур при полях $E > 4 \cdot 10^6$ В/см линейны в координатах Пула-Френкеля и определяются объемными свойствами $Si_3N_4/4/$.



Р и с. 3. Релаксация проводимости структур. а) Структура восстановлена светом: 1 - исходная структура ($r_0 = 0,3$ В/дек), 2 - деградированная структура ($r(0) = 2,3$ В/дек), 3 - восстановленная структура ($r = 1,5$ В/дек). б) Структура восстановлена в темноте: 1 - исходная структура ($r_0 = 0,3$ В/дек), 2 - деградированная структура ($r(0) = 1,6$ В/дек), 3 - восстановленная структура ($r(40 \text{ дн.}) = 1,1$ В/дек)

Тот факт, что вместе со скоростью стекания релаксирует также и стационарная проводимость структуры, указывает на то, что восстановление затрагивает весь объем Si_3N_4 .

Выводы. 1. Многократные переключения структур приводят к неравновесной заселенности ловушек в Si_3N_4 . 2. Процесс релаксации характеристик структуры при комнатной температуре является обратимым и затрагивает весь объем Si_3N_4 . 3. Освещение He-Ne лазером ускоряет процесс восстановления структуры. 4. Скорость восстановления структуры уменьшается со временем.

Поступила в редакцию
3 января 1980 г.

Л и т е р а т у р а

1. Чжан, ТИИЭР, 64, № 7, 20 (1976).
2. А. Ф. Плотников, Р. Г. Сагитов, З. Я. Садыгов, В. Н. Селезнев, Письма в ЖТФ 6, 3 (1980).
3. И. В. Коробов, А. Ф. Плотников, В. М. Попов, В. Н. Селезнев, Квантовая электроника, 2, 2013 (1975).
4. S. M. Sze, J. Appl. Phys., 38, 2951 (1967).