

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА МНОП-СТРУКТУР МЕТОДОМ ТЕРМОАКТИВАЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.Ф. Плотников, Д.Н. Токарчук

УДК 621.382

*Методом термостимулированной деполяризации исследовано изменение спектрального распределения захватываемого поляризационного заряда в  $Si_3N_4$  как при деградации, так и при последующем термическом отжиге МНОП-структур. Показано, что деградация МНОП-структур в значительной степени обусловлена заполнением глубоких ловушек  $Si_3N_4$  компенсационным зарядом.*

Многократные переключения МНОП-структур из одного зарядового состояния в другое приводят к потере их способности сохранять захватываемый заряд в течение длительного времени [1,3,5]. Это связано с уменьшением эффективной энергии ионизации центров захвата в слое  $Si_3N_4$  при деградации [1-3]. Для определения физической причины этого явления в настоящей работе исследовано изменение спектрального распределения захватываемого поляризационного заряда в  $Si_3N_4$  при деградации и последующем термическом отжиге МНОП-структур.

Исследования проводились на МНОП-емкостях с туннельно-тонким слоем  $SiO_2$  толщиной 18-20 Å. Слой  $Si_3N_4$  толщиной 1000 Å наносился при  $T = 840$  °С в соотношении  $SiCl_4 : NH_3 = 10^{-2}$ . Деградация МНОП-структур осуществлялась многократным переключением при  $T = 300$  К из одного зарядового состояния в другое импульсами напряжения амплитудой  $\pm 50$  В и длительностью  $10^{-4}$  с. Отжиг деградированных структур производился на воздухе. Спектральное распределение захватываемого поляризационного заряда оценивалось по кривым термостимулированной деполяризации в режиме линейного нагрева [4].

На рис. 1 приведены кривые токов термостимулированной деполяризации (ТСД) для исходной структуры (кривая 1), структуры, подвергнутой  $10^7$  циклам переключения (кривая 2), и структур, подвергнутых после  $10^7$  циклов переключения отжигу при различных температурах (кривые 3-7). У ис-

ходной МНОП-структуры захватываемый положительный поляризационный заряд имеет широкое спектральное распределение с максимумами при температурах 360, 530, 660 К (рис. 1, кривая 1). У структуры, подвергнутой  $10^7$  циклам переключения, наблюдается один пик на кривой ТСД с максимумом при  $T = 330$  К. Отжиг деградированных структур приводит к смещению кривых ТСД в область более высоких температур и появлению на них характерного максимума при температуре  $T_2$ , близкой к температуре отжига. Обращает на себя внимание резкий спад тока ТСД при температурах, больших чем  $T_2$ , которая является как бы высокоэнергетичной границей спектрального распределения захватываемого поляризационного заряда в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

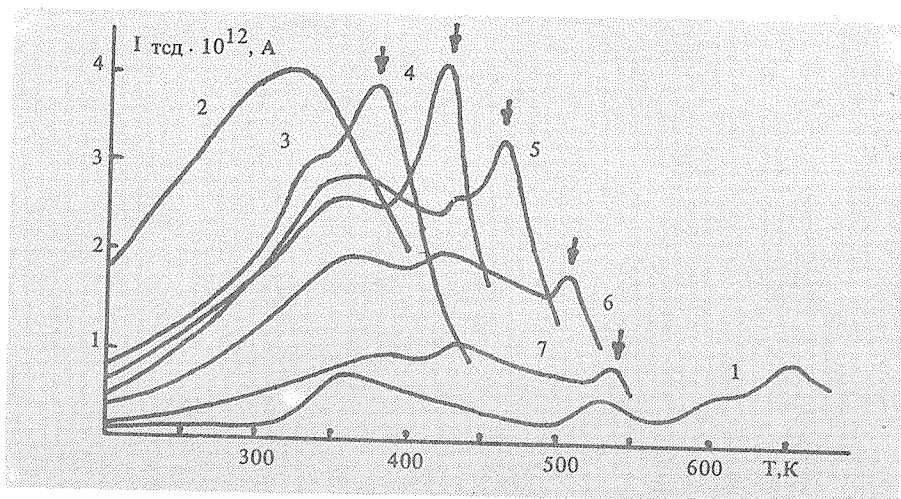
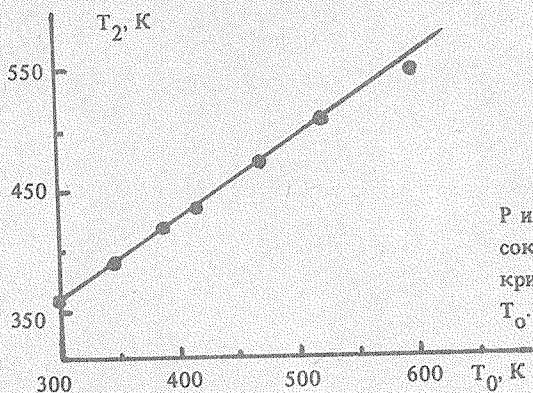


Рис. 1. Токи термостимулированной депольаризации для исходной структуры (1), после  $10^7$  циклов переключения (2) и после отжига при температурах 350 К (3), 420 К (4), 470 К (5), 535 К (6), 580 К (7). Скорость нагрева 0,2 К/с, начальное значение напряжения плоских зон – 14 В. Стрелками указано положение высокотемпературного максимума кривых  $T_2$ .

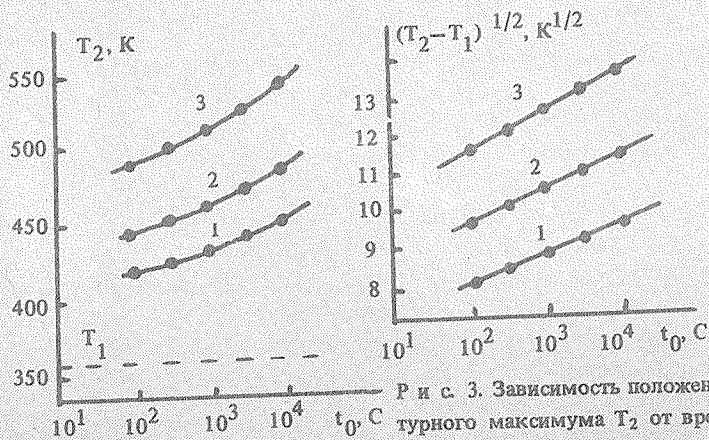
На рис. 2 приведена зависимость между температурой отжига  $T_0$  и положением высокотемпературного максимума  $T_2$ . В рассматриваемом интервале температур отжига эта зависимость линейна. Зависимость  $T_2$  от времени отжига для различных температур показана на рис. 3. Анализ экспериментальных кривых для зависимости  $T_2$  от времени отжига  $t_0$  дает:  $T_2 = 355 \text{ К} + \gamma \ln^2(t_0/\tau_0)$ , где  $\gamma$  коэффициент, зависящий от температуры отжига. Экстраполяция спрямленных кривых  $(T_2 - T_1)^{1/2} = \gamma^{1/2} \ln(t_0/\tau_0)$  до пересечения с

ось абсцисс (рис. 3) дает для постоянной времени отжига оценку  $\tau_0 = 10^{-9} - 10^{-10}$  с.

Наблюдаемую в эксперименте линейную зависимость между температурой отжига и положением высокоэнергетичной границы спектра захватываемого поляризационного заряда не удастся объяснить в рамках модели "дефектообразования", где предполагается генерация мелких центров захвата в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при деградации МНОП-структур [1,2/]. Однако эта зависимость естественным образом следует из предложенной ранее "компенсационной" модели деградации [3,5/], если учитывать наличие непрерывного спектра центров захвата в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [6/].



Р и с. 2. Зависимость положения высокотемпературного максимума  $T_2$  кривых ТСД от температуры отжига  $T_0$ . Время отжига  $3 \cdot 10^2$  с.



Р и с. 3. Зависимость положения высокотемпературного максимума  $T_2$  от времени отжига. Температура отжига 410 К (1), 450 К (2), 520 К (3).

В рамках этой модели многократные переключения МНОП-структур из одного зарядового состояния в другое приводят к увеличению вплоть до единицы функции заполнения донорных и акцепторных центров захвата в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , имеющих энергию ионизации  $E_t \geq E_t^{\max}$ , где  $E_t^{\max}$  — максимальная глубина ловушек в  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , опустошаемых за время действия импульса переключения /5/. Поляризационный заряд в этом случае захватывается на ловушки с  $E_t \leq E_t^{\max}$ ; в результате наблюдается кажущееся уменьшение энергии ионизации ловушек в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при деградации.

В простейшем случае, когда при термическом выбросе заряда с ловушек не учитывается ни процесс перезарядки, ни влияние случайного поля компенсационного заряда на вероятность выброса, для положения фронта заполнения ловушек в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  компенсационным зарядом, а, следовательно, и положения высокотемпературной границы спектрального распределения поляризационного заряда будет справедливо выражение  $E_t^{\max} = kT_0 \ln(t_0 \nu_t)$ , где  $\nu_t$  — частотный фактор ловушек  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Оно хорошо описывает наблюдаемую в эксперименте линейную зависимость  $T_2 \propto E_t^{\max}$  от температуры отжига. Тот факт, что в эксперименте наблюдается зависимость  $T_2 \propto \ln^2(t_0/\tau_0)$ , а не  $T_2 \propto \ln(\nu_t t_0)$ , связан, вероятно, с более сложным механизмом выброса и рекомбинации компенсационного заряда.

Поступила в редакцию 19 июня 1985 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Масловский В. М., Нагин А. П. ЖТФ, **49**, 1855 (1979).
2. Гузев А. А. и др. Электронная техника, сер. (3), вып. 2 (80), 27 (1979).
3. Плотников А. Ф. и др. Письма в ЖТФ, **6**, 431 (1980).
4. Гороховатский Ю. А. Основы термодеполяризационного анализа. М., Наука, 1981.
5. Агафонов А. И. и др. Микроэлектроника, **10**, 127 (1981).
6. Lundkvist L. et al. Solid-State Electr., **19**, 221 (1976).