



Doctoral Thesis

Beiträge zur Charakterisierung des Programmier-, Speicher- und Ausdauerhaltens von Eeprom-Zellen mit Floating-Gate Struktur

Author(s):

Bleiker, Christoph

Publication Date:

1987

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000471592> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 8331

**BEITRÄGE ZUR CHARAKTERISIERUNG DES
PROGRAMMIER-, SPEICHER- UND AUSDAUER-
VERHALTENS VON EEPROM-ZELLEN
MIT FLOATING-GATE STRUKTUR**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels eines
Doktors der Technischen Wissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

Zürich, den 18. Dez. 87 *Klaus Bleiker*

vorgelegt von
CHRISTOPH BLEIKER
Dipl. El. Ing. ETH
geboren am 24. März 1958
von Hemberg SG

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. H. Melchior, Referent
Prof. Dr. W. Guggenbühl, Korreferent

Zürich 1987

Abstract

Electrically erasable programmable read only memories (EEPROM) are widely used in computer systems, where the stored information has to be maintained even in case of a power break. Beside various manufacturing problems to be solved there exists a need for an in depth electrical characterization and modelling of these devices.

It is the object of this work to develop adequate models for the programming- (write and erase), the retention- and the endurance-characteristics of floating-gate memory cells with a tunnel oxide for injection (FLOTOX) and to compare these simulations with measurements, which are carried out at FLOTOX elements with a p-doped injector-drain and the Fowler-Nordheim tunneling as injection mechanism in the temperature range $77\text{ K} < T < 473\text{ K}$.

The programming characteristics describe the dependences of the threshold voltage after writing or erasing on the applied voltages at the electrodes, on the pulse-duration, on the thickness of the injection oxide, on the temperature and on the doping-density in the injector-drain, respectively. Previous models consider only the dependences on the first three parameters leading to an inaccurate simulation of the writing procedure. As will be shown a better description of the programming characteristics is obtained by allowing for the voltage drops in the polysilicon and the injector-drain and their work function difference. Considering these additional potential losses the tunneling current exhibits the Fowler-Nordheim characteristics with the same quantitative parameters for writing and erasing of the cell. In addition the generation of minority carriers in the injector during writing of the element has been found to be significant. For doping densities N_A in excess of 10^{18} cm^{-3} minority carriers are generated by Band to Band Tunneling while for $N_A < 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ Avalanche Multiplication in the injector takes place.

Retention of the charge stored on the floating-gate is found to be independent of charge loss mechanisms but to be proportional to the threshold voltage shift induced by the programming of the cell. This change in threshold voltage shows two different time dependences. For $t < 10^6\text{ sec}$ it is proportional to $\log(t)$ while for $t > 10^6\text{ sec}$ a $t^{1/4}$ dependence exists. This behavior is modeled by a new Interface-Trap Model, which assumes that traps at the polysilicon interfaces are occupied or depleted depending on the applied potential at the electrodes and on the charge stored on the floating-gate. Tunneling of carriers from the silicon into the trap sites and diffusion of water molecules through the oxide are considered as transition mechanisms. For the latter mechanism an activation energy of 0.37 eV is determined which agrees

well with the values reported for the Micropore Model.

The endurance characteristics of the cell are modeled on the basis of a universal trapping equation for negative bulk oxide traps in the injection oxide. The threshold voltages after writing and erasing are calculated in function of the number of write / erase cycles and the typical negative charge trapping parameters of the injection oxide - σ_{eff} , the effective cross section and N_{eff} , the effective trap density - which can be determined by I-V measurements. Additionally for the first few cycles positive charge trapping near the silicon and the polysilicon interfaces in the injection area are observed, which depend on the applied voltages and on the pulse rise time.

Using these models the limits of the applications of EEPROM cells as analog storage devices are estimated.

Zusammenfassung

Electrically-Erasable Programmable Read Only Memories (EEPROM) werden in zunehmendem Masse in Computersystemen als Halbleiterspeicher eingesetzt, weil sie gegenüber statischen oder dynamischen RAM's den Vorteil haben, dass sie bei Spannungsausfall die gespeicherte Information nicht verlieren. Nebst den Schwierigkeiten, hochwertige Injektionsoxid-Schichten herzustellen, ist auch die Charakterisierung des elektrischen Verhaltens der Elemente, d.h. die Spezifikation des Programmier- (Schreiben und Löschen), des Speicher- und des Ausdauer-Verhaltens ziemlich komplex und teilweise noch unbekannt.

In dieser Arbeit werden einfache Modelle zur Beschreibung von Floating-Gate Zellen, die mittels Fowler-Nordheim Tunneling beschrieben und gelöscht werden und einen p^+ -dotierten Injektor-Drain aufweisen, hergeleitet und durch Messungen im Temperaturbereich $77\text{ K} < T < 473\text{ K}$ überprüft.

Das Programmier-Verhalten beschreibt die Abhängigkeiten der Schwellwerte U_{T2} nach dem Schreiben und Löschen von den angelegten Elektrodenspannungen, der Programmierdauer, der Temperatur, der Injektionsoxid-Dicke sowie der Dotierung des Injektors. Bisherige Modelle zur Berechnung der Schwellwerte nach dem Schreiben und Löschen berücksichtigen einzig die Abhängigkeit von der Dicke des Injektionsoxides, was zu einer ungenauen Beschreibung des Programmier-Verhaltens führt. Um eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Schwellwerten zu erreichen, werden oftmals die Fowler-Nordheim Konstanten in diese Kurven eingepasst, wodurch diese Konstanten von der Injektionsoxiddicke abhängig werden und zuverlässige Aussagen für andere Oxiddicken verunmöglichen. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass das Programmier-Verhalten bei Berücksichtigung der Potentialverläufe im Polysilizium und im Injektor-Drain sowie der Austritts-Differenz der beiden Materialien besser beschrieben werden kann und dass gleiche Fowler-Nordheim Konstanten fürs Löschen und Schreiben für alle betrachteten Injektionsoxiddicken ($7.8\text{ nm} < d_{Ox} < 13.6\text{ nm}$) resultieren. Im weiteren wird auf die Bedeutung der Minoritätsträgerkonzentration im Injektor (Elektronen) und ihre Auswirkungen auf das Schreib-Verhalten eingegangen. Aus dem Programmier-Verhalten geht hervor, dass die Elektronen für Dotierungsdichten $N_A > 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ durch Band zu Band Tunneling und für $N_A < 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ durch Avalanche Multiplikation generiert werden.

Zur Beschreibung des Speicher-Verhaltens wird ein neues, sog. Interface-Trap Modell entwickelt. Dabei wird angenommen, dass Interface-Traps nahe an der Grenzschicht des Polysiliziums mit dem Oxid je nach angelegtem Feld entladen oder aufgefüllt

werden. Dies kann entweder durch Tunneling von Ladungsträgern an der Zwischenschicht oder durch die Diffusion von Teilchen durchs Oxid geschehen. Für kurze Speicherzeiten ist der Tunneling Vorgang dominierend, während für sehr lange Zeiten ($t > 10^6$ sec) die chemischen Vorgänge am Interface überhand nehmen. Messungen bei verschiedenen Temperaturen legen den Schluss nahe, dass Wassermoleküle für diese chemischen Veränderungen gemäss dem Micropore Modell verantwortlich sind. Das gemessene Speicher-Verhalten konnte durch dieses neue Modell gut beschrieben werden, während mit dem gebräuchlichen thermionischen Emissionsmodell nur bei Elementen ohne Passivierungsschicht, und mit dem Tunneling Modell gar keine Übereinstimmung erzielt werden konnte.

Zur Modellierung des Ausdauer-Verhaltens wird eine generelle Beschreibung des Trapping von Elektronen im Injektionsoxid benützt. Die Schwellwerte nach dem zyklischen Schreiben und Löschen können somit in Funktion der Zyklenzahl bestimmt werden, wobei die charakteristischen Grössen des Injektionsoxides, der effektive Einfangquerschnitt σ_{eff} und die effektive Trappedichte N_{eff} , auch aus I-V Messungen gewonnen werden können. Damit wird erstmals ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Charakterisierung des Injektionsoxids und dem Ausdauer-Verhalten von FLOTOX Zellen hergestellt. Zudem wurde während der ersten Programmierzyklen oder nach dem Verändern der Elektrodenbedingungen beim Schreiben ein Auf- resp. Abbau von positiven Ladungen im Injektionsoxid sehr nahe an den Interface festgestellt, deren Anzahl von den Programmierspannungen und der Anstiegszeit des Schreibpulses abhängt.

Schliesslich wird mit den beschriebenen Modellen abgeschätzt, wie gross die Schwellwertänderungen aufgrund der Interface-Trap Bildung sind, und welche Genauigkeiten bei verschiedenen Temperaturen und Speicherzeiten erreicht werden können. Dies bestimmt im Wesentlichen die möglichen Anwendungen solcher FLOTOX Zellen als Analog Speicher.