ZWEI-DIMENSIONALE TRANSIENTE SIMULATION DES EINSCHALTVERHALTENS EINES PLANAREN MOS-TRANSISTORS

W.Kausel, G.Nanz, S.Selberherr, H.Pötzl

Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik
Abt. für CAE
TU - WIEN, Gußhausstraße 27-29, A-1040 WIEN

ZUSAMMENFASSUNG:

Auf Grund der steigenden Schaltgeschwindigkeiten integrierter Schaltkreise ist das Schaltverhalten von MOS-Transistoren von größter Bedeutung für den Bauelementhersteller. MOS-Transistoren finden nicht nur in herkömmlichen CMOS- Logik-Schaltungen Verwendung, sondern auch in Leistungsbauelementen (z.B: MOS gesteuerten Thyristoren). Wir zeigen daher eine vollständige zwei dimensionale transiente Simulation des Ein- und des Ausschaltvorganges eines planaren MOS- Transistors mit einer Kanallänge L_{eff}=0.7μm. Die Simulation wurde mit dem Device Simulator BAMBI durchgeführt, der die drei Halbleitergleichungen mit Hilfe eines Newton- Algorithmus auf einem Rechteckortsgitter und einem Zeitgitter simultan löst [1,2].

1.Einschaltvorgang

Das Dotierungsprofil des simulierten Transistors zeigt Bild 1. Es handelt sich hierbei um ein realistisches Profil, das mit Hilfe analytischer Funktionen [3] gewonnen wurde. Auf eine tiefe Kanalimplantation wurde verzichtet, da diese ohne Bedeutung für das transiente Verhalten des Bauelementes ist und in den betrachteten Spannungsbereichen kein Durchbruch auftritt. Die Kanaldotierung unterhalb des Oxides beträgt N_a=1·10^{17}cm^{-3}, die Substratdotierung N_a=6·10^{15}cm^{-3}; die Oxiddicke ist d_{ox}=250Å.

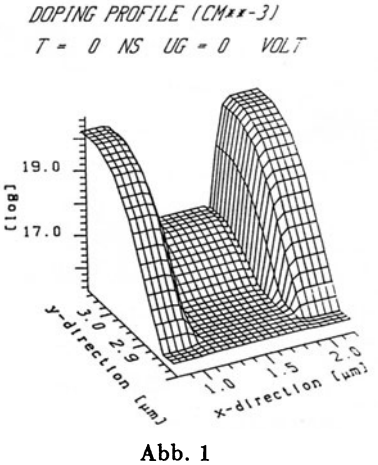


Abb. 1

Bei einer Drainspannung von $V_d = 5V$ wird am Gate nach 20ps mit einer Spannungsrampe angesteuert, die in 50ps von -0.3V auf 7V ansteigt, wodurch der Transistor in den Triodenbereich geschaltet wird.

Die Bilder 2-9 zeigen nun die Entwicklung der Elektronenkonzentration und der Löcherkonzentration im Kanalbereich. Im stationären Zustand sind die Trägerdichten im thermodynamischen Gleichgewicht (Abb. 2,3). Deutlich ist die drainseitige Raumladungszone (RLZ) durch den Beginn des Anstieges der Elektronenkonzentration bzw. des Abfalles der Löcherkonzentration bei $x = 1.6\mu m$ zu erkennen. Unmittelbar unter dem Gate ergibt sich in der RLZ ein kleine Akkumulation von Löchern. Schon nach 10ps ist die Elektronenkonzentration signifikant angestiegen, und man sieht, daß sich eine Inversionsschicht ausbildet, während die Löcher langsam von der Oberfläche wegfließen(Abb. 4,5). Drainseitig ist die RLZ unverändert geblieben, und die Träger können den pn-Übergang nicht passieren, während sourceseitig die Sperrwirkung fast völlig verloren gegangen ist und die erhöhte Löcherkonzentration schwache Injektion anzeigt. Dieser Prozess setzt sich fort, und weitere 20ps später ist der Kanal bis auf eine kleine Pinch-Off Zone fast vollständig aufgebaut, unter der sich noch immer ein

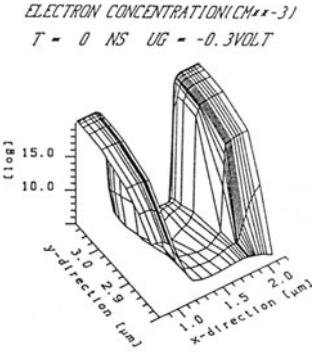


Abb. 2

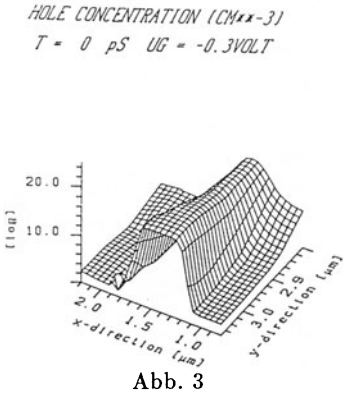


Abb. 3

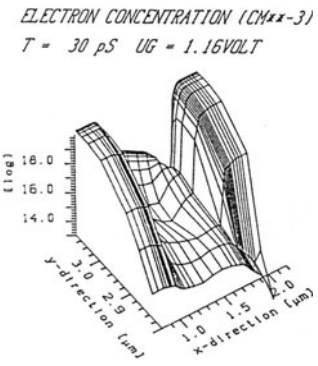


Abb. 4

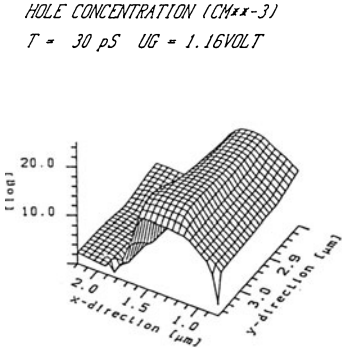


Abb. 5

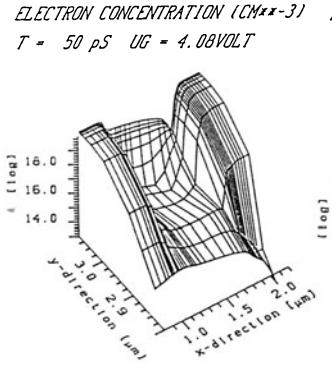


Abb. 6

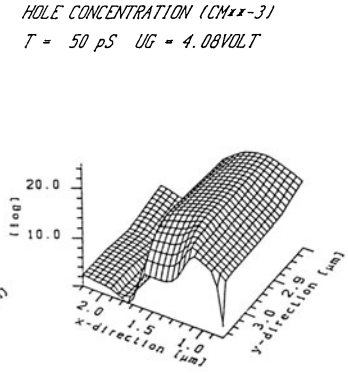


Abb. 7

transversales Feld befindet, das die kleine Anhebung der Konzentration hervorruft(Abb. 6). Die Löcher verarmen an der Oberfläche und fließen weiterhin zurück in die Bulkregion (Abb. 7). Bild 8 zeigt, daß die Elektronen nach 50ps ihren Endzustand erreicht haben, da die Gatespannung weit über der Einsatzspannung liegt. Die Inversionsschicht ist durchgehend von Source nach Drain vorhanden und tiefer im Bulk hat die Elektronenkonzentration bis zu den pn-Übergängen konstantes Niveau. Die Löcher sind zwar unmittelbar an der Oberfläche vollständig verarmt (Abb. 9), haben ihren Endzustand aber noch nicht erreicht. Die Verarmung setzt sich tiefer im Bulk, drainseitig durch das laterale Feld begünstigt, noch nach dem Schaltprozess fort, was auch durch den Verlauf des Kontaktstromes aus dem Bulk bestätigt wird.

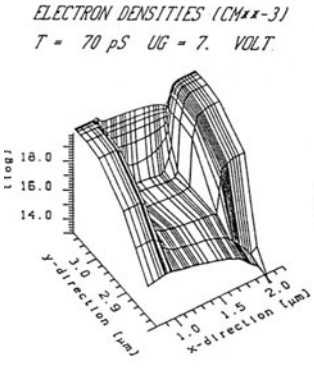


Abb. 8

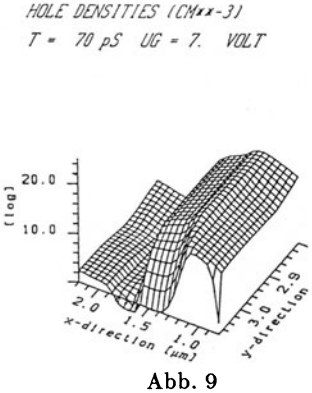


Abb. 9

Der Potentialverlauf im stationären Zustand wird durch den Verlauf der RLZ'n bestimmt, wobei zu beachten ist, daß drainseitig die RLZ tiefer im Bulk, auf Grund der dortigen niedrigeren Bulkdotierung, gößer ist als unmittelbar unterhalb der Oberfläche (Abb. 10). Im Laufe des Schaltvorganges steigt das Potential an der Oxidgrenzschicht entsprechend der Elektronenzunahme kontinuierlich an, bis es schließlich in der gesamten Region zwischen Source und Drain, durch die hohe negative Ladung (Elektronen und Akzeptoren), einen Zustand mit positiver Krümmung annimmt (Abb. 11).

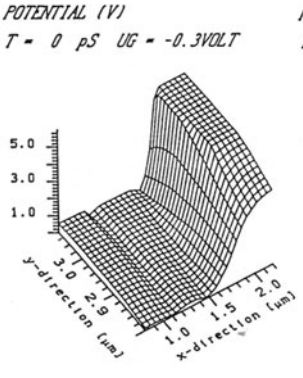


Abb. 10

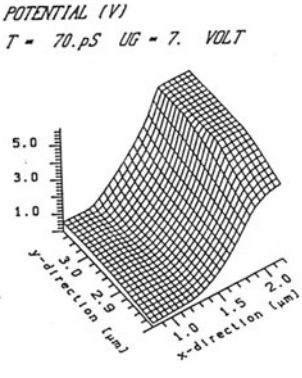


Abb. 11

Der Betrag des elektrischen Feldes im stationären Zustand zeigt uns deutlich den Verlauf der beiden RLZ'n (Abb. 12). Schon 10ps nach Beginn des Einschaltvorganges ist das Feld sourceseitig fast völlig verschwunden (Abb. 13). Gleichzeitig entsteht an der Grenzschicht ein Inversionsfeld, das den Kanalaufbau verursacht. Drainseitig hat sich die Feldspitze unter dem Oxid verkleinert. Die Feldrichtung an dieser Stelle weist natürlich immer noch eine starke Komponente in positive y-Richtung auf. Nach 70ps (50ps nach Beginn des

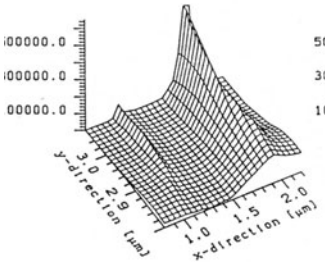


Abb. 12

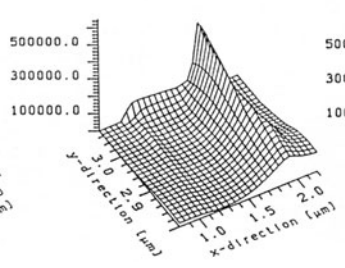


Abb. 13

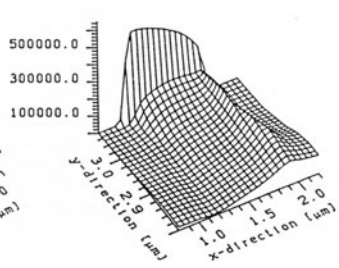
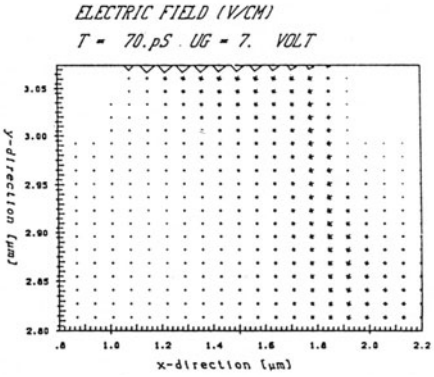


Abb. 14

Einschaltvorganges) ist das Maximum der Gatespannung erreicht, das Feld unmittelbar an der Halbleiteroberfläche ist stark angestiegen (Abb. 14). Es weist über die ganze Kanallänge in negative y-Richtung. Ab 0.2μm Tiefe ergibt sich drainseitig eine stark reduzierte laterale Feldkomponente (Abb. 15).



Die Bilder der Elektronenstromdichte beweisen, daß der Kanal anfänglich nur von Source her aufgebaut wird, da der drainseitige pn-Übergang gesperrt ist. Die Elektronenstromdichte hat genau am pn-Übergang einen Nulldurchgang (Abb. 16) und wechselt dort die Richtung (Abb. 17). Mit fortschreitendem Wachstum der Inversionsschicht steigt die Elektronenstromdichte dramatisch an (Abb. 18), wobei sich nahe von Source ein Maximum ergibt. Dieses Maximum ist durch eine Strompfadeinschnürung begründet (Abb. 19), die durch die Feldrichtung (Abb. 15) hervorgerufen wird.

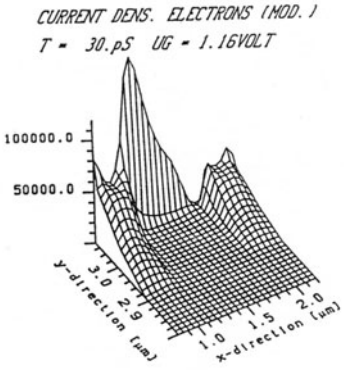


Abb. 16

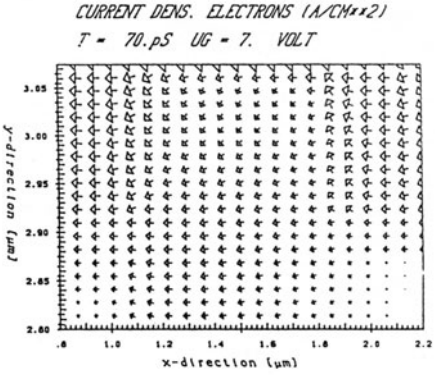


Abb. 17

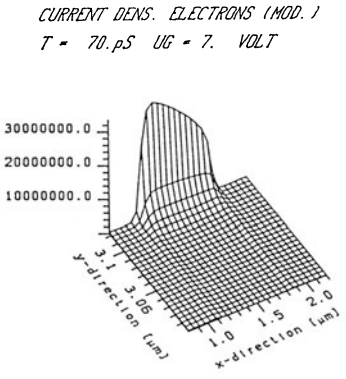


Abb. 18

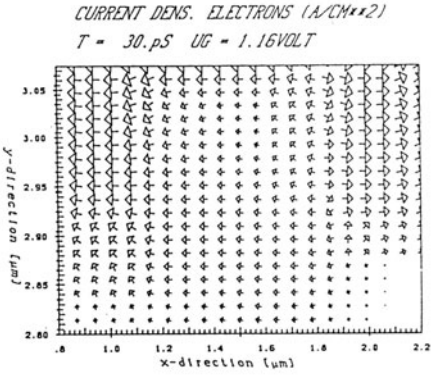


Abb. 19

Der Löcherstrom führt die Löcher von der Halbleiteroberfläche zurück in den Bulk und zum Bulkkontakt (Abb. 20). Die Stromrichtung ergibt sich aus der Feldrichtung. Deutlich ist die Verschiebung der Stromdichte tiefer zurück in den Bulk entsprechend der Verarmung der Löcher an der Oberfläche zu erkennen(Abb. 21), bis schließlich ein schmaler Strompfad entsteht, der die verbleibenden Löcher aus dem Gebiet abführt (Abb. 22).

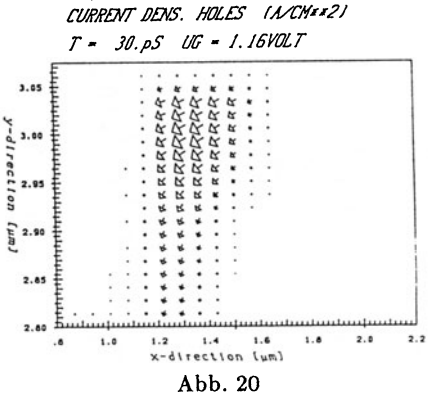


Abb. 20

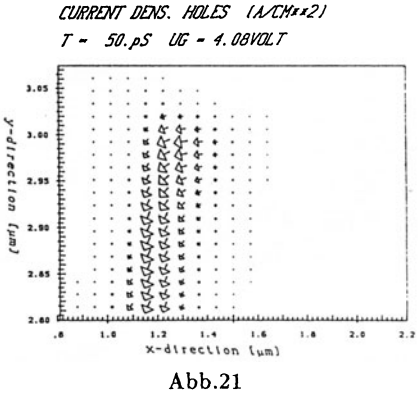


Abb.21

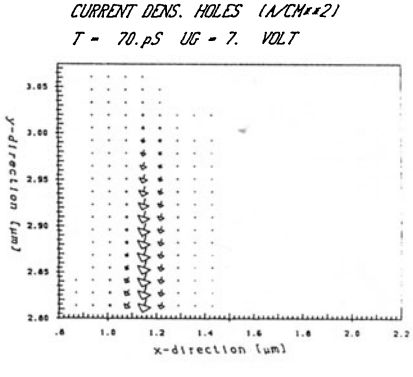


Abb. 22

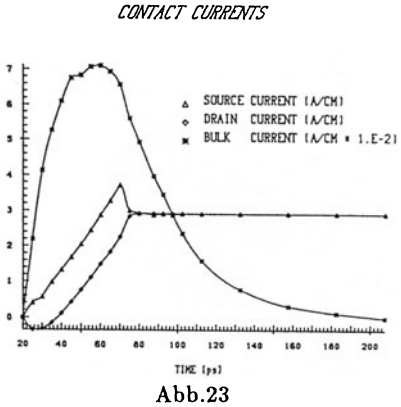


Abb.23

Der Verlauf der Kontaktströme(Abb. 22) zeigt typisches transientes Verhalten. Source- und Bulkstrom fließen aus dem Bauelement heraus, während der Drainstrom anfänglich ebenfalls herausfließt, entsprechend der Transitzeit der Kanalladung, nach einer Verzögerungszeit von τ_d =18ps sein Vorzeichen aber wechselt. Die Differenz von Source- und Drainstrom vom stationären Stromwert I_0 ergibt sich nach [4,5] durch den Aufbau der Speicherladung im Kanalbereich.

$$I_0 = -0.5 \cdot \mu \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{gd}^2 - V_{gs}^2) \quad (1)$$

$$I_s(t) = I_0 - \frac{dQ_s}{dt} \quad (2)$$

$$I_d(t) = I_0 + \frac{dQ_d}{dt} \quad (3)$$

$$Q_s(t) = -q \cdot W \cdot \int_A (1 - \frac{y}{L}) \cdot n(x,y,t) \cdot dA \quad (4)$$

$$Q_d(t) = -q \cdot W \cdot \int_A \frac{y}{L} \cdot n(x,y,t) \cdot dA \quad (5)$$

(1) beschreibt die stationäre Stromkennlinie. (2),(3) beschreiben die transienten Kontaktströme. Die Speicherladungen ergeben sich aus der gewichteten Integration über die Elektronenverteilung und über die Fläche A unterhalb des Gates (4),(5).
Der Bulkstrom steigt stark an, entsprechend dem Aufbau der RLZ unterhalb des Gates, erreicht vor dem Endwert der Gatespannung sein Maximum und nimmt dann langsam ab, bis die Löcher ihre stationäre Verteilung erreicht haben.

Literaturverzeichnis:

[1] A.F.FRANZ, G.A.FRANZ, BAMBI-A Design Model for Power MOSFET's
in IEEE Trans. on CAD, Vol.Cad-4, No.3, July 85, p.177

[2] A.F.FRANZ, G.A.FRANZ, S.SELBERHERR, CH.RINGHOFER, P.MARKOWICH
Finit Boxes-A Generalization of the Finite-Differences Method Suitable for Semiconductor Device Simulation
in IEEE Trans.on Electr.Dev., Vol. ED-30, No.9, Sept 83

[3] S.SELBERHERR, Analysis and Simulation of Semiconductor Devices,
Springer-Verlag 1984

[4] SOO-YOUNG OH, D.E.WARD, R.W.DUTTON
Transient Analyses of MOS Transistors
in IEEE Trans. on Electr.Dev., Vol. ED-27, No.8, Aug.80

[5] K.GOSER Einschaltzeiten und Umladungsvorgänge bei MOS-Transistoren
in AEÜ, Band 24, 1970, Heft 1