Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 75 (1984)

Heft: 3

Artikel: Nicht-flüchtige Speicher und ihre potentielle Anwendung um Analogbereich

Autor: Bleiker, C. / Melchior, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904354

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 31.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Nicht-flüchtige Speicher und ihre potentielle Anwendung im Analogbereich

C. Bleiker und H. Melchior

EEPROM-Zellen mit Floating-Gate und Avalanche-Injection oder Fowler-Nordheim-Tunneling zum Speichern, Schreiben und Löschen von Information werden beschrieben und ihre Eignung zur Speicherung von Analogsignalen gezeigt. Erste Versuche erreichten Programmierdynamiken über 40 dB und Genauigkeiten von 1%. Sofern störende Ladungsverluste durch Mehrzellenschaltungen kontrollierbar werden, sind interessante Anwendungen zu erwarten.

Description des cellules EEPROM à porte flottante et injection à avalanche ou effet tunnel Fowler-Nordheim, pour mémoriser, écrire et effacer des informations, ainsi que de leur aptitude à mémoriser des signaux analogiques. Les premiers essais ont permis une dynamique de programmation de plus de 40 dB et une précision de 1%. Si de gênantes pertes de charge dues à des circuits à plusieurs cellules peuvent être maîtrisées, d'intéressantes applications seront possibles.

Vortrag anlässlich des «Fall Meeting 1983» des «IEEE Swiss Section Chapter on Solid-State Devices», am 18. Oktober 1983 in Bern.

Der Vortrag ist aus einer Forschungsarbeit entstanden, die am Institut für angewandte Physik im Rahmen des Nationalfonds-Projektes NFP-13 durchgeführt wird. Die EEPROM-Zellen wurden vom CEH, Neuchâtel, und von Faselec AG, Zürich, zur Verfügung gestellt.

Adresse der Autoren

C. Bleiker und Prof. Dr. *H. Melchior*, Institut für angewandte Physik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

1. Einleitung

Erste EPROM-Elemente (Electrically-Programmable Read-Only-Memory) mit Floating-Gate benutzten zum Einschreiben die Avalanche-Injection und wurden durch Bestrahlen mit UV-Licht wieder gelöscht [1]. Diese FAMOS-Zellen (Floating-Gate Avalanche-Injection Type) besitzen jedoch den Nachteil, dass sie zum Löschen von der übrigen Schaltung entfernt werden müssen. Deshalb wurden Memories entwickelt, die auch elektrisch gelöscht werden können. Die erste Generation solcher EEPROM (Electrically Erasable-Programmable ROM) mit Floating-Gate benutzten zum Einschreiben die Avalanche-Injection und zum Löschen das *Fowler-Nordheim*-Tunneling [2; 3]. Später wurden FLOTOX-Zellen (Floating-Gate-Tunnel-Oxide) gebaut, die sowohl zum Programmieren als auch zum Löschen das *Fowler-Nordheim*-Tunneling ausnutzen [4]. Die Funktionsweisen der SAMOS-(Stacked-Gate Avalanche-Injection MOS) und der FLOTOX-Elemente werden im folgenden erläutert.

Diese Zellen wurden bis jetzt vor allem zur Speicherung von digitaler Information verwendet. Wie hier näher dargelegt werden soll, gibt es verschiedene Möglichkeiten, diese Elemente zur Speicherung von analogen Signalen zu benutzen. Im speziellen werden eine Schaltung zum Speichern von Analogspannungen und erste Messresultate präsentiert. Schliesslich werden auch einige potentielle Anwendungen von solchen Analogspeichern aufgezeigt.

2. Funktionsweise

Die Funktionsweise einer Zelle mit Avalanche-Injection soll anhand der schematischen Darstellung in Figur 1a erläutert werden: Die Zelle besteht aus einem *p*-Kanal-Transistor, aus zwei Gates zum Steuern des Transistors (einem Floating-Gate und einem darüber angeordneten Control-Gate) sowie einem Injector-Drain. Damit eine kontrollierbare Avalanche-Injection stattfindet, muss mindestens eine Kante dieser p^+-Diffusion unterhalb des Floating-Gates liegen. Zwischen den beiden Gates liegt ein Oxid mit konstanter Dicke, während das Oxid unter dem Floating-Gate über dem Kanal und dem Injector-Drain viel dünner ist als an den übrigen Stellen. Für die Anwendung ist eine grosse Kopplungskapazität zwischen den beiden Gates erwünscht. Dies wird durch eine grosse gemeinsame Fläche erreicht.

Zum Programmieren einer ungeladenen Zelle wird am Injector-Drain eine negative Spannung V_P angelegt. Ist diese Spannung grösser als die Breakdownspannung des p^+-n-Überganges, so fliesst ein Avalanche-Strom vom Injector-Drain zum Substrat, der durch einen externen Widerstand be-

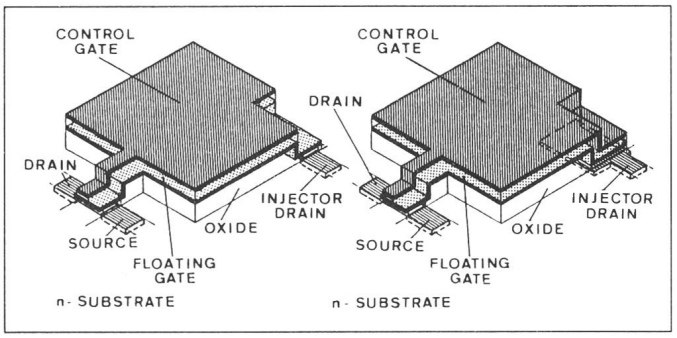

Fig. 1
EEPROM-Zelle mit
(a) Avalanche-Injection und
(b) Fowler-Nordheim-Tunneling als Einschreibmechnismus

einflusst werden kann. Ein gewisser Prozentsatz an Elektronen des Avalanche-Stromes besitzt genügend Energie, um die Si-SiO_2-Potentialbarriere zu überqueren und ins Oxid und damit auf das Floating-Gate zu gelangen. Nach dem Entfernen der Injector-Drain-Spannung fliessen keine Elektronen mehr durch das Oxid, und die Ladungen auf dem Floating-Gate bleiben erhalten, da dieses völlig in isolierendes SiO_2 eingebettet ist. Die gefangenen negativen Ladungen bewirken jedoch, dass der *p*-Kanal-Transistor leitet.

Zum Löschen der Zelle wird eine genügend grosse, negative Spannung am Control-Gate angelegt, die bewirkt, dass Elektronen vom Floating-Gate mittels *Fowler-Nordheim*-Tunneling ins Substrat getrieben werden. Dies geschieht grundsätzlich überall dort, wo das Oxid zwischen dem Floating-Gate und dem Substrat dünn ist. Der Löscheffekt variiert jedoch für verschiedene Polysilizium-Dotierungen sowie unterschiedliche Gateanordnungen [5]. Der Transistor einer gelöschten Zelle sperrt.

In Figur 1b ist eine Zelle mit Fowler-Nordheim-Programmierung dargestellt. Das Element besteht ebenfalls aus einem *p*-Kanal-Transistor, einem Floating- und einem Control-Gate sowie einem Injector-Drain. Im Gegensatz zum Avalanche-Injection-Typ ist hier der Injector-Drain völlig unter das Floating-Gate geführt. Damit wird auch beim Programmieren das Fowler-Nordheim-Tunneling ausgenutzt. Zusätzlich konnte das Control-Gate über das Injektionsgebiet vergrössert und damit die Kopplungskapazität der beiden Gates etwas erhöht werden.

Wird eine negative Spannung am Injector-Drain angelegt, so dass die kritische Feldstärke des Tunneleffekts im Injektionsoxid überschritten wird, so fliessen Elektronen durch das Oxid auf das Floating-Gate. Da dieser Strom einzig vom angelegten Feld abhängt, sind keine externen Strombegrenzungen notwendig. Ausserdem fliesst sämtlicher Strom vom Injector-Drain auf das Floating-Gate, während beim Avalanche-Injection-Typ nur ein kleiner Anteil des Gesamtstromes durch das Oxid fliesst. Nach dem Entfernen der Programmierspannung bleiben die negativen Ladungen auf dem Floating-Gate und bewirken, dass der *p*-Kanal-Transistor leitet.

Gelöscht wird wiederum mit einer negativen Spannung am Control-Gate. Dadurch fliessen die Elektronen durch alle dünnen Oxidfenster entweder ins Substrat oder in den Injector-Drain ab. Im gelöschten Zustand sperrt der Transistor wieder.

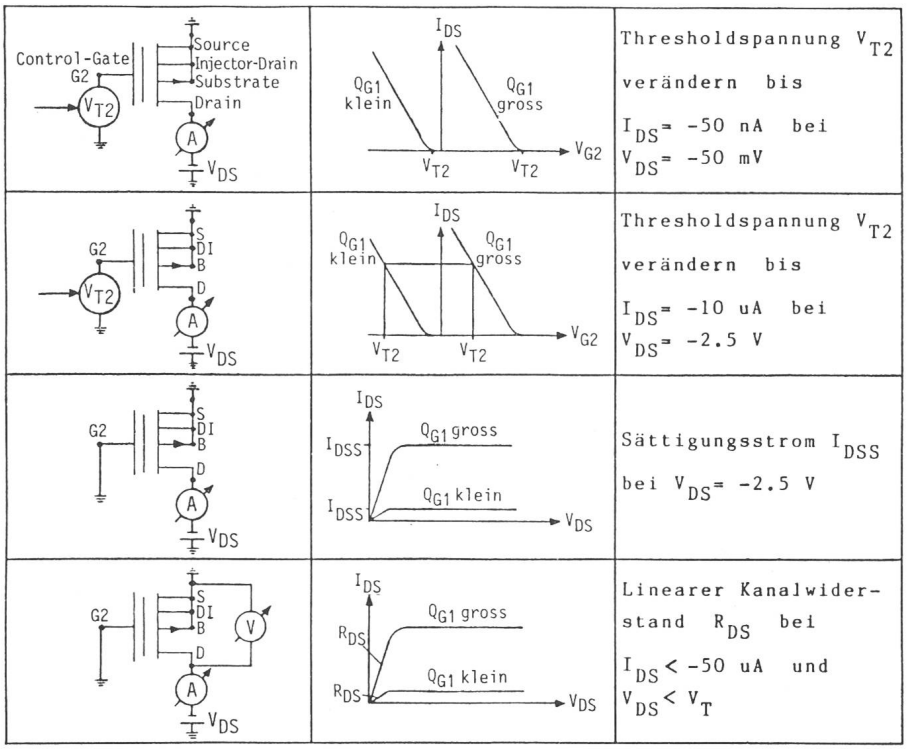

Fig. 2 Möglichkeiten zum Anzeigen des Ladungszustandes einer EEPROM-Zelle

3. Möglichkeiten zum Bestimmen des Ladungszustandes einer Zelle

Im Gegensatz zu den digitalen Anwendungen, wo der Ladungszustand der Zelle durch das Leiten oder Sperren des *p*-Kanal-Transistors angezeigt wird, müssen bei der Benützung der Elemente als Analogspeicher andere Indikatoren verwendet werden. In Figur 2 sind vier Möglichkeiten mit den entsprechenden Bedingungen für die zugänglichen Elektroden sowie den jeweiligen Betriebspunkten in den Transistorkennlinien dargestellt.

Die beiden ersten Möglichkeiten benutzen zum Anzeigen des Zustandes die Thresholdspannung V_{T2}, die am Control-Gate angelegt wird. Im ersten Fall wird diese Spannung solange verändert, bis ein gewisser Kanalwiderstand, der durch V_{DS} und I_{DS} vorgegeben wird, erreicht ist. Diese Werte werden so gewählt, dass der Transistor im Subthresholdbereich arbeitet [5]. Im zweiten Fall wird der Transistor im Sättigungsgebiet betrieben. Die Spannung am Control-Gate wird dabei solange verändert, bis ein geforderter Sättigungsstrom durch den Kanal fliesst. In beiden Fällen sind Spannungsänderungen proportional zu Ladungsänderungen auf dem Floating-Gate [2]. Je mehr negative Ladungen gespeichert sind, desto positiver wird auch die Thresholdspannung. Diese kann nach dem Löschen auch negativer als die ursprüngliche Thresholdspannung werden.

Im dritten Beispiel wird der Ladungszustand des EEPROM durch den Sättigungsstrom bei geerdetem Control-Gate angezeigt. Dieser Strom ist um so grösser, je mehr negative Ladungen gespeichert sind.

Schliesslich kann auch der Kanalwiderstand gemessen werden, wobei das Control-Gate geerdet und am Drain eine kleine negative Spannung angelegt wird. Der Widerstand kann in Abhängigkeit der Ladungen auf dem Floating-Gate in gewissen Bereichen verändert werden.

Zur Bestimmung des Ladungszustandes wurde bis jetzt die erste und wohl gebräuchlichste Methode benutzt [5]. Dazu wurde die in Figur 3 gezeigte Schaltung aufgebaut [6]. Dieser Regelkreis ermöglicht ein automatisches, kontinuierliches Bestimmen der Thresholdspannung V_{T2}, da der Operationsverstärker seine Ausgangsspannung solange ändert, bis der EEPROM-Transistor die geforderten Kanalei-

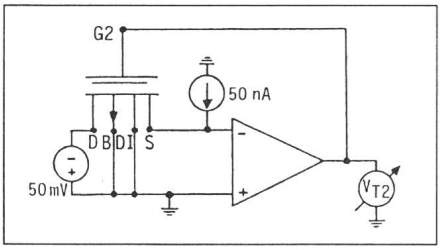

Fig. 3 Regelkreis zum Bestimmen der Thresholdspannung V_{T2} einer EEPROM-Zelle

genschaften erreicht hat. Diese werden durch eine Strom- und eine Spannungsquelle definiert. Aus dem Wert von V_{T2} und dessen zeitlichen Änderungen können Rückschlüsse auf den Ladungszustand respektive Ladungsänderungen gezogen werden.

4. Speicherung von Analogspannungen und erste Messresultate

Die beschriebene Ausleseschaltung kann zu einem Steuerkreis erweitert werden, der ein kontrolliertes Programmieren der Zelle erlaubt (Fig. 4). Während dem Programmieren (Schalterstellung 1) wird am Control-Gate diejenige Analogspannung angelegt, die im EEPROM abgespeichert werden soll. Das Ausgangssignal des Operationsverstärkers steuert eine Logik, die die Programmierspannung V_P solange am Injector-Drain angelegt lässt, bis genügend Ladungen auf dem Floating-Gate sind, so dass die geforderten Kanaleigenschaften des EEPROM-Transistors erreicht sind. Dann wird auf den Auslesekreis umgeschaltet (Schalterstellung 2), und die Thresholdspannung V_{T2} ist nun, da gleiche Kanaleigenschaften wie beim Programmieren herrschen, gleich der vorhin am Control-Gate angelegten Analogspannung.

Mit dieser Schaltung können beliebige Analogspannungen abgespeichert und als Thresholdspannung V_{T2} wieder ausgelesen werden.

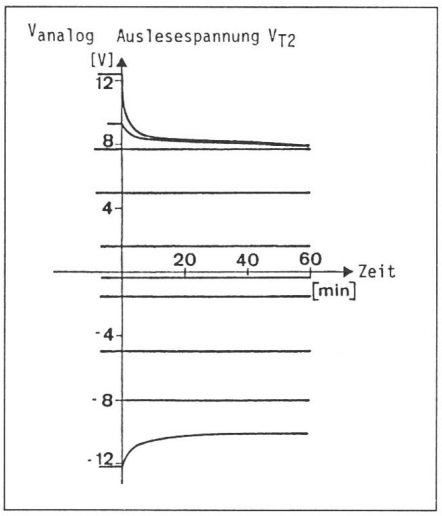

Fig. 5 Analogspannungsbereich zum Speichern in EEPROM des Fowler-Nordheim-Typs

Eine solche Speicherung von Analogspannungen ist sowohl für das Element mit Avalanche-Injection als auch für jenes mit Fowler-Nordheim-Tunneling möglich. Im folgenden wurden die Untersuchungen auf den Fowler-Nordheim-Typ beschränkt, da dieser bessere Verlusteigenschaften besitzt und geringere Programmierspannungen und -ströme benötigt.

In Figur 5 ist auf der linken Seite die angelegte Analogspannung zum Speichern, auf der rechten Seite die jeweilige Auslesespannung dargestellt. Für kleine Grössen ist die Auslesespannung V_{T2} gleich der programmierten Analogspannung und ändert sich innerhalb einer Stunde nur um wenige mV. Für Spannungen, die gewisse Grenzwerte überschreiten, treten dagegen sehr grosse Verluste auf. Dadurch ist der nutzbare Spannungsbereich begrenzt.

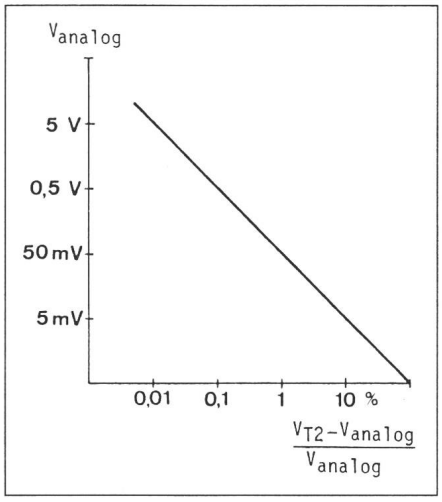

Fig. 6 Relative Programmiergenauigkeit in Funktion der Analogspannung (Fowler-Nordheim-Typ EEPROM)

In Figur 6 ist die Programmiergenauigkeit in Funktion der Analogspannung aufgetragen. Da der Programmierfehler für alle Spannungen gleich ist und etwa 500 µV beträgt, wird die Programmiergenauigkeit für kleinere Analogspannungen schlechter. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einer Spannung von mehr als 50 mV die Genauigkeit über einem Prozent liegt.

Mit einem zulässigen Programmierfehler von einem Prozent und einem Spannungsbereich von −10 V bis 8 V ergibt dies eine Signaldynamik von über 40 dB. Zum Vergleich sei erwähnt, dass für dieselbe Dynamik bei einer Genauigkeit von ±1 LSB (Least Significant Bit) ein A/D-Wandler mit 15 bit Auflösung benötigt würde.

Nach dem Programmieren und dem Löschen haben alle Elemente sog. Anfangsverluste. In Figur 7 sind die zeitlichen Thresholdspannungsänderungen

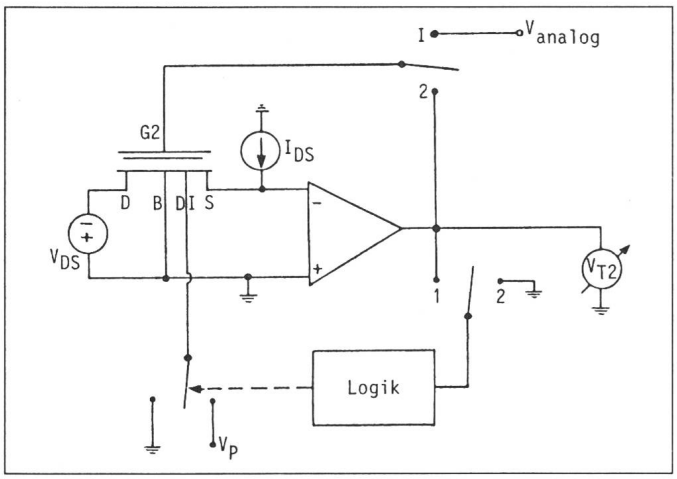

Fig. 4 Programmierschaltung zur Speicherung von Analogspannungen in einer EEPROM-Zelle

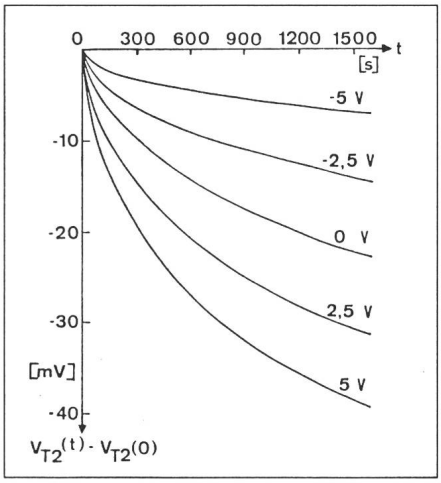

Fig. 7 Anfangsverluste für verschiedene Programmierspannungen

für verschiedene Programmierspannungen dargestellt. Dabei wurde eine Zelle mit Fowler-Nordheim-Programmierung zuerst auf die Auslesespannung von -6 V gelöscht und 2 h in diesem Zustand belassen, damit Randeffekte von früheren Schreibvorgängen möglichst unterdrückt werden. Dann wurde das Element auf verschiedene Analogspannungen programmiert und die Thresholdspannung V_{T2} während 25 min gemessen. Man sieht deutlich, dass für grössere Spannungsunterschiede zwischen gelöschtem und programmiertem Zustand auch grössere Anfangsverluste auftreten.

Durch geeignete Schaltweise mehrerer EEPROM-Zellen sollten diese Anfangsverluste sowie nach Möglichkeit auch die Langzeitveränderungen kompensiert werden können.

5. Potentielle Anwendungen

Sofern eine Kompensation gelingt, können EEPROM in folgenden Gebieten als nicht-flüchtige Analogspeicher eingesetzt werden:

- in Schaltungen mit beschränkter Anzahl Speicherdaten, wo sich der Einsatz von A/D- und D/A-Wandlern nicht lohnt,
- in Filtern, die bis etwa 15. Ordnung mit geringerem Aufwand in Analogweise gebaut werden,
- zum kurzfristigen Speichern von Analogdaten bei Stromausfällen,
- als programmierbare Stromquellen oder Offsetkompensatoren in CMOS-Schaltungen.

Beispielsweise könnten diese Zellen zum Speichern einzelner Referenzgrössen von Sensoren oder zum Abspeichern der Filtercharakteristiken eines Hörgerätes verwendet werden.

Literatur

[1] *D. Frohman-Bentchkowsky:* FAMOS - a new semiconductor charge storage device. Solid-State Electronics 17(1974)6, p. 517...529.

[2] *Y. Tarui, Y. Hayashi* and *K. Nagai:* Electrically reprogrammable nonvolatile semiconductor memory. IEEE Journal of Solid-State Circuits 7(1972)5, p. 369...381.

[3] *H. Iizuka* a. o.: Electrically-alterable avalanche-injection-type MOS read-only memory with stacked-gate structure. IEEE Trans. ED 23(1976)4, p. 379...387.

[4] *W. S. Johnson* a. o.: 16-K EE-PROM relies on tunneling for byte-erasable program storage. Electronics 53(1980)5 (February 28), p. 113...117.

[5] *B. Gerber* and *J. Fellrath:* Low-voltage single supply CMOS electrically erasable read-only memory. IEEE Trans. ED 27(1980)7, p. 1211...1216.

[6] *A. Wallinga:* A method for the measurement of the turn-on condition in MOS-transistors. Solid-State Electronics 14(1971)11, p. 1093...1098.