Die großen Herausforderungen in der Mikroelektronik in den nächsten zehn Jahren

S. Selberherr[1]

Seit der Geburt der Mikroelektronik mit der Erfindung der integrierten Schaltung vor 40 Jahren beobachten wir ihre ungebrochene Weiterentwicklung. Heutige mikroelektronische Schaltungen können etliche Millionen Bauelemente auf kleinstem Raum beherbergen, was es gestattet, neue und neuartige elektronische Systeme für bisher ungeahnte Anwendungen kostengünstig zu erzeugen. Diese Weiterentwicklung wird auch in den nächsten zehn Jahren nicht gebremst werden, was unsere Phantasie in Hinblick auf die möglichen Anwendungen bei weitem überfordert. Es gilt jedoch, einige große Herausforderungen anzunehmen und Lösungen für die damit verbundenen Probleme zu finden: Neue Szenarien für finanzierbare Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen werden erforderlich. Neue Meß- und Testtechniken müssen entwickelt werden. Schaltungen werden mit Signalen im Gigahertz-Frequenzbereich arbeiten. Neue Materialien werden eingesetzt werden. Neue Konzepte für die elektrische Verbindung der integrierten Bauelemente werden zu ersinnen sein. Nicht zuletzt werden neue kostengünstige und schnelle Verfahren zur Übertragung von komplexen Strukturen mit charakteristischen Längen kürzer als 100 nm erforderlich. Wir können einer spannenden Zeit entgegensehen.

Schlüsselwörter: Mikroelektronik; Halbleitertechnologie; integrierte Schaltung; Miniaturisierung; Meßtechnik

The grand challenges in microelectronics in the next ten years. Since the birth of microelectronics which took place with the invention of the integrated circuits 40 years ago we have been able to watch its unbroken development. Today's microelectronic circuits can contain millions of devices. This fact makes it possible that completely new electronic systems can be produced for a reasonable price. The evolution of microelectronics will remain unbroken for the next 10 years, which is beyond all imagination. Nevertheless we have to accept major challenges and find solutions for associated problems. New affordable scenarios for research and development have to be found. New techniques for metrology and testing have to be developed. Circuits will operate on signals in the Gigahertz-frequency range. New materials will be used. New concepts for interconnects of integrated elements have to be found. Furthermore new inexpensive and effective methods to transfer complex structures of less than 100 nm feature size will be required. We are going to live in an exciting time.

Keywords: microelectronics; semiconductor technology; integrated circuit; miniaturization, metrology

1. Einführung

Am 16. Dezember 1947 wurde in den Bell Laboratorien von John Bardeen und Walter Brattain in der Forschergruppe von William Shockley (Abb. 1) der Transistoreffekt entdeckt [2]. Der Versuchsaufbau bestand aus einem Germaniumkristall mit zwei gleichrichtenden Punktkontakten aus Gold, die den Emitter und den Kollektor repräsentieren, und einem flächenhaften nie-

[1] O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Siegfried Selberherr, IEEE Fellow, Institutsvorstand, Institut für Mikroelektronik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27–29/E360, A-1040 Wien.

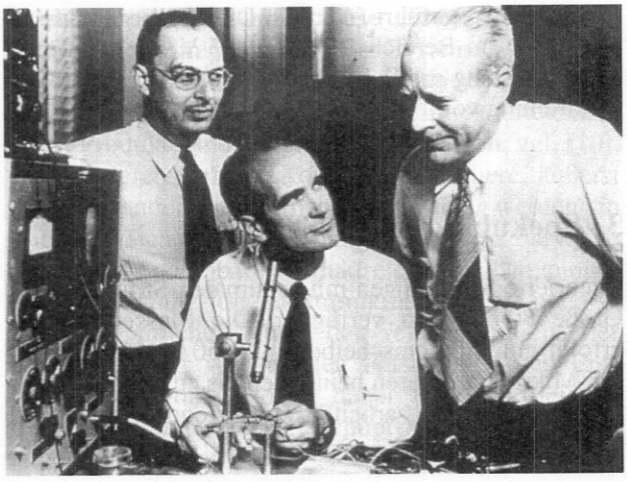

Abb. 1. Die Entdecker des Transistoreffektes: John Bardeen, William Shockley und Walter Brattain

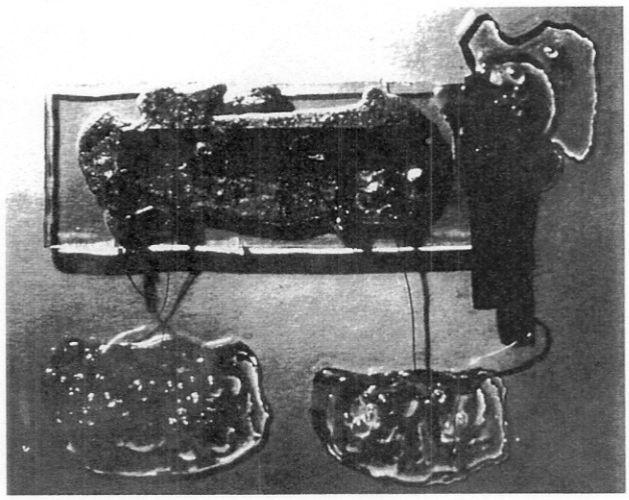

Abb. 3. Die Idee der integrierten Schaltung von Jack Kilby

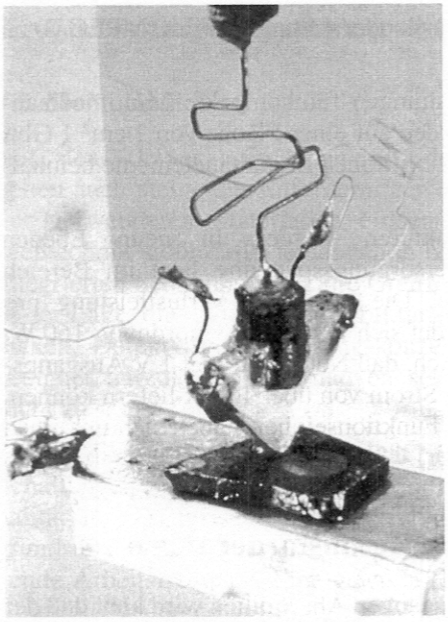

Abb. 2. Der erste Transistor: Versuchsaufbau vom 16. Dezember 1947

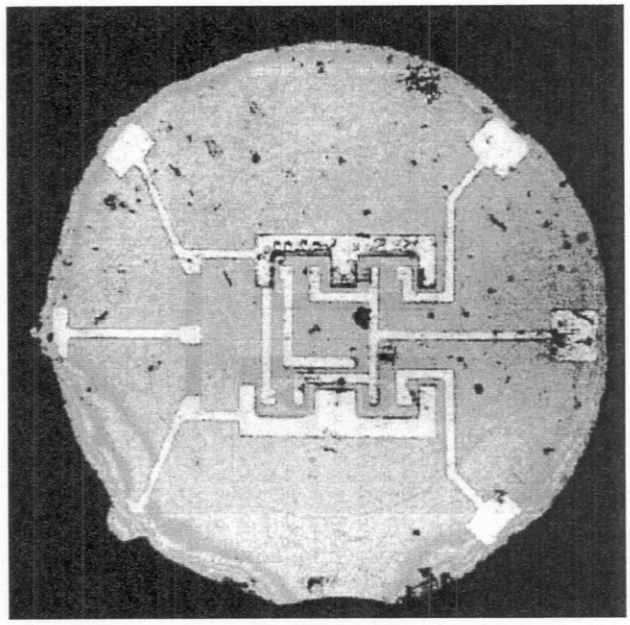

Abb. 4. Eine der ersten integrierten Schaltungen: eine Flip-Flop-Schaltung

derohmigen Basiskontakt (Abb. 2). Der Name Transistor wurde übrigens von John Pierce, der ebenfalls in den Bell Laboratorien forschte, im Mai 1948 als Kunstwort, kombiniert aus transconductance und varistor, geprägt [14]. Es war eine Entdeckung gelungen, die im Begriffe ist, unser Leben nachhaltig, wie wahrscheinlich keine andere Entdeckung zuvor, zu verändern. Selbst mit bescheidener Phantasie war abzusehen, daß, nachdem es gelungen war, einen Schalter ohne bewegte Teile zu erzeugen, die Verbindung vieler solcher Schalter in eine integrierte Schaltung nur ein konsequenter Folgeschritt ist. Den ersten wesentlichen Beitrag dazu setzte Jack Kilby [7] mit seiner Idee, mehrere Bauelemente auf einem Substrat zu befestigen und mit Drähtchen zu verbinden (Abb. 3). Den Durchbruch jedoch initiierte Robert Noyce [11] mit seinen Überlegungen, auch die Verbindungen zwischen den Bauelementen mit einem planaren Fertigungsprozeß zu erzeugen (Abb. 4). Die Geburt der integrierten Schaltung war somit erfolgreich abgeschlossen.

2. Stand der Technik 1998

Integrierte Schaltungen mit minimalen Strukturen der Größe 250 nm sind in großen Stückzahlen verfügbar. Die Massenfertigung erfolgt auf Siliziumscheiben mit 200 mm Durchmesser. Mikroprozessoren, wie in Abb. 5 dargestellt, beinhalten bis zu 15 Millionen Bauelemente und arbeiten mit Frequenzen bis zu 600 MHz [6]. Speicherbausteine mit 256 Mbit Fassungsvermö-

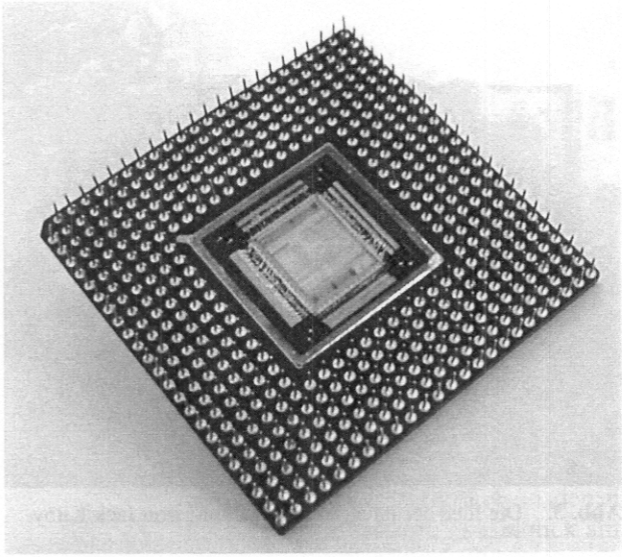

Abb. 5. Der digital Alpha-Mikroprozessor

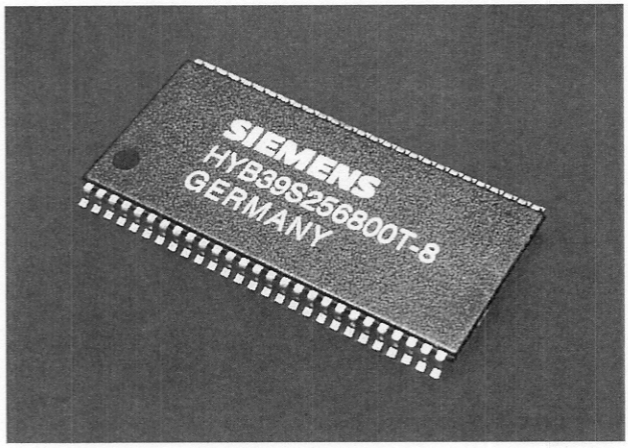

Abb. 6. Ein 256-Mbit-Speicherbaustein

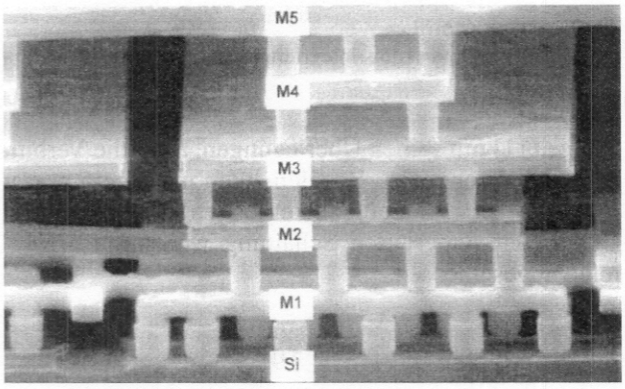

Abb. 7. Beispiel einer Verbindungsstruktur mit einer Polysiliziumlage und fünf Metallagen

gen (Abb. 6) werden in großen Mengen produziert; Prototypen von 1 Gbit Speicherbausteinen erbringen den Nachweis, grundsätzlich für ein Massenprodukt geeignet zu sein [8]. Verbindungsstrukturen werden in sechs Ebenen geführt (Abb. 7). Die Versorgungsspannung liegt im Bereich 1,8 V bis 2,5 V. Die maximale Verlustleistung pro Schaltung befindet sich in der Größenordnung von 70 W.

3. Spekulationen für 2008

Integrierte Schaltungen mit minimalen Strukturen der Größe 80 nm sind verfügbar. Die Massenfertigung erfolgt auf Siliziumscheiben mit 450 mm Durchmesser. Mikroprozessoren beinhalten bis zu 150 Millionen Bauelemente und arbeiten mit Frequenzen bis zu 4 GHz.

Speicherbausteine mit 16 Gbit Fassungsvermögen werden produziert; 64 Gbit-Prototypen von Speicherbausteinen existieren in Laboratorien. Derartige Bausteine sind in der Lage, etwa 250 000 Seiten Text, 100 Stunden Musik oder 4 Stunden Film (MPEG-2) zu speichern.

Integrierte Schaltungen für kompakte Multimediaanwendungen werden auf einer Fläche von 1 cm^2 1 Gbit Speicher und 50 Millionen Logikbauelemente beinhalten [12].

Verbindungsstrukturen werden in neun Ebenen geführt. Die Versorgungsspannung liegt im Bereich 0,6 V bis 1,2 V. Die maximale Verlustleistung pro Schaltung befindet sich in der Größenordnung 160 W; dies bedeutet auch, daß Netzgeräte mit 1 V Ausgangsspannung einen Strom von über 150 A liefern können. Die Kosten pro Funktionseinheit haben sich um einen Faktor 15 (Gatter) – 30 (Bit) reduziert.

4. Die großen Herausforderungen

Aus den vorangegangen Abschnitten wird klar, daß der antizipierte Fortschritt in der Mikroelektronik mit erheblichen Anstrengungen auf vielen Gebieten verbunden ist.

Einige der dabei auftretenden Fragestellungen sind mit Geld allein nicht behandelbar, sondern benötigen neue, mehrere Disziplinen übergreifende Ansätze, die in der Geschichte keine Vorgänger haben. Mit ähnlichem Empfinden sieht dies die amerikanische Semiconductor Industry Association, die in ihrer National Technology Roadmap for Semiconductors von sogenannten Grand Challenges spricht [13]. Im folgenden wird auf die großen Herausforderungen, die im weltweiten Konsens gesehen werden, eingegangen.

4.1 Forschung und Entwicklung

In den ersten Jahrzehnten der integrierten Schaltung wurden die wesentlichen Forschungsergebnisse in den Laboratorien großer, vertikal integrierter Firmen

erzielt. Finanziert wurden diese Laboratorien durch den Gewinn beim Verkauf großer Systeme, welche die selbst gefertigten integrierten Schaltungen verwendeten. Durch die Globalisierung des Marktes für elektronische Produkte und integrierte Schaltungen, vgl. [10], restrukturieren sich die Konzerne in flachere, äußerst produktorientierte Unternehmen. Dabei werden in weiten Bereichen die Forschungsaktivitäten, die keine unmittelbar erkennbare Produktrelevanz haben, eingespart. Heute nutzt die Elektronikindustrie oft noch in einem beachtlichen Maße den reichen Fundus der Ergebnisse ihrer vergangenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, ohne dabei zu gewährleisten, daß dieser Fundus nicht erschöpft [1]. Forschung in mikroelektronischen Aufgabenstellungen benötigt eine sehr teure Infrastruktur, die obendrein auf Grund des beachtlichen Fortschritts einer atemberaubenden Alterung unterliegt. Neue Paradigmen müssen gefunden werden, um die erforderlichen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zukünftig zu ermöglichen [5].

4.2 Meßtechnik und Testen

Mit den kleiner werdenden Strukturabmessungen gehen auch steigende Anforderungen an die Reinheit der verwendeten Materialien einher. Die etablierte Meßtechnik stößt dafür leider schon bei den heutigen integrierten Schaltungen an ihre Grenzen und ist kaum in der Lage, die auftretenden Strukturgrößen, Schichtdicken, Defekt- und Dotierungskonzentrationsprofile geeignet aufzulösen; Alternativen scheinen nicht in Sicht zu sein.

Durch die steigende Komplexität der integrierten Schaltungen wird das Testen ihrer logischen Funktionalität immer aufwendiger. Vervielfacht wird diese grundsätzliche Schwierigkeit durch die parallel steigende Arbeitsfrequenz. Eine gewisse Hoffnung geben Konzepte basierend auf in die Schaltungen direkt eingebaute Selbsttests (Built-In Self-Test, BIST), jedoch werden diese heute nur in Speicherbausteinen eingesetzt.

4.3 Gigahertz Schaltungstechnik

Heutige integrierte Schaltungen arbeiten mit Frequenzen bis zu einigen 100 MHz. Um Geschwindigkeitssteigerungen zu erzielen, ist es wünschenswert, die Arbeitsfrequenz in den Gigahertzbereich zu erhöhen. Dabei wird es allerdings notwendig, die Schaltungstechnik entsprechend anzupassen, da die Vernachlässigung diverser physikalischer Effekte, die im Megahertzbereich keine bemerkenswerten Probleme bereitet, im Gigahertzbereich für die ordnungsgemäße Funktion einer Schaltung nicht möglich ist. Bei einer Frequenz von 10 GHz ist die elektromagnetische Wellenlänge von 3 cm vergleichbar mit den Abmessungen der integrierten Schaltung. Damit ist es unmöglich, Elemente einer Schaltung als diskrete Elemente zu beschreiben. Neue Ansätze müssen gefunden werden, mit welchen integrierte Schaltungen für Höchstfrequenzanwendungen entworfen werden können. Selbstverständlich gewinnt dabei auch die Einbindung der integrierten Schaltung in das System enorm an Bedeutung [9]. Man darf nicht vergessen, daß ein elektrisches Signal in 0,1 ns höchstens 3 cm zurücklegen kann. Lösungen hiefür werden den vollständigen Systementwurf mit der gemeinsamen Berücksichtigung der integrierten Schaltung, der erforderlichen Peripheriekomponenten und der Gehäuse der Schaltungen und des Systems als Einheit betrachten.

4.4 Neue Materialien

Im Gleichlauf mit der voranschreitenden Miniaturisierung der Bauelementstrukturen werden auch die Gateoxiddicken dünner. Eine grundsätzliche Grenze, bedingt durch den Tunneleffekt, der einen parasitären Stromfluß verursacht, liegt bei etwa 1,5 nm Dicke. Durch die Verwendung neuer Materialien mit höherer Dielektrizitätszahl anstelle von Siliziumdioxid sowie mit höherer Leitfähigkeit anstelle von Polysilizium kann diese Grenze für den Bauelemententwurf akzeptiert werden. Weiters werden neue Materialien mit niedriger Dielektrizitätszahl als Isolator und bessere Leiter für die Verbindungsstrukturen erforderlich. Um den Anforderungen, die mit hohen Betriebsfrequenzen einhergehen, gerecht zu werden, müssen auch neue Materialien für die Gehäuse der integrierten Schaltungen eingesetzt werden.

4.5 Verbindungsstrukturen

Moderne integrierte Schaltungen nutzen schon bis zu sechs Lagen von Verbindungsstrukturen (eine Lage Polysilizium und fünf Lagen Aluminium). Durch die Miniaturisierung gewinnen die dabei existierenden parasitären Effekte, wie kapazitive Kopplung zwischen den Verdrahtungsstrukturen, Signalverzögerungen auf Grund endlicher Leitfähigkeit, Aufheizung durch hohe Stromdichten etc., massiv an Bedeutung [3]. Durch die zunehmende Anzahl von Verbindungsstrukturlagen werden zusätzliche physikalische Bedingungen an die Verbindungslogistik gestellt, die mit heutigen Methoden nicht bewältigbar sind.

4.6 Lithographie

Seit der Erfindung der integrierten Schaltung erfolgt die Strukturübertragung mit lithographischen Techniken, die sichtbares Licht nutzen. Heute verwendet man in den besten Forschungslaboratorien Lichtquellen im tiefen Ultraviolett mit einer Wellenlänge von 193 nm. Damit kann man bestenfalls Strukturen mit charakteristischen Größen der Länge 140 nm abbilden [4]. Eine Überleitung dieser Techniken zur Anwendung in der

Massenfertigung wird noch mehrere Jahre dauern. Verbesserungen sind noch bis zu Strukturabmessungen im Bereich 100 nm vorstellbar. Bis dato sind jedoch keine optisch transparenten Materialien für Licht mit kürzerer Wellenlänge bekannt. Es ist zu vermuten, daß für die Übertragung von noch kleineren Strukturen ein komplett neuer Weg, vielleicht mit extrem kurzwelligen ultravioletten Lichtquellen, Röntgen- oder Ionenstrahlung, gefunden werden muß.

5. Ausblick

Die Evolution der Mikroelektronik wird noch länger als die nächsten zehn Jahre andauern. Neue Effekte, die heute eher als unangenehm und parasitär gesehen werden, wie zum Beispiel diverse Quanteneffekte, werden konstruktiv eingesetzt werden. So könnten auf der Basis von sogenannten Ein-Elektron-Bauelementen elektronische Systeme mit 1000mal mehr Bauelementen, die 1000mal schneller schalten und ein Tausendstel der Leistung benötigen, in verwirklichbare Reichweite gelangen. Systeme mit der Gedächtniskapazität eines Menschen, ungefähr 10 TByte, und der Schlußfolgefähigkeit eines Menschen, ungefähr 10^{15} Operationen pro Sekunde, werden vorstellbar. In spätestens 25 Jahren sind sie verwirklicht!

Schrifttum

[1] Bamelis, P., Weirich, C., Staudt, E., Wohlfahrt, H.: Die Zukunft der Industrieforschung. Spektrum der Wissenschaft (1997), H. 11, S. 34–47.

[2] Bardeen, J., Brattain W. H.: The transistor, a semi-conductor triode. Phys.Rev. 74 (1948), S. 230–231.

[3] Bohr, M. T.: Interconnect scaling – The real limiter to high performance ULSI. Proceedings Intl. Electron Devices Meeting IEDM (1995), S. 241–244.

[4] Brunner, T.: Pushing the limits of lithography for IC production. Proceedings Intl.Electron Devices Meeting IEDM (1997), S. 9–13.

[5] Erichsen H. U., Frühwald, W., Markl, H., Schipanski, D., Treusch, J., Warnecke, H. J.: Die Krise der Forschung. Spektrum der Wissenschaft (1997), H. 5, S. 30–42.

[6] Gieseke, B. A., Allmon, R. L., Bailey, D. W., Benschneider, B. J., Britton, S. M., Clouser, J. D., Fair, H. R., Farrel, J. A., Gowan, M. K., Houghton, Ch. L., Keller, J. B., Lee, T. H., Leibholz, D. L., Lowell, S. C., Matson, M. D., Matthew, R. J., Peng, V., Quinn, M. D., Priore, D. A., Smith, M. J., Wilcox, K. E.: A 600 MHz superscalar RISC microprocessor with out-of-order execution. Proceedings Intl. Solid-State Circuits Conference ISSCC (1997), S. 176–177.

[7] Kilby, J. S.: Invention of the integrated circuit. IEEE Trans. Electron Devices ED-23 (1976), S. 648–653.

[8] Kim, K. N., Lee, J. Y., Lee, K. H., Noh, B. H., Nam, S. W., Park, Y. S., Kim, Y. H., Kim, H. S., Kim, J. S., Park, J. K., Lee, K. P., Lee, K. Y., Moon, J. T., Choi, J. S., Park, J. W., Lee, J. G.: Highly manufacturable 1 Gb SDRAM. Digest of Technical Papers: Symposium on VLSI Technology (1997), S. 9–10.

[9] Nakamura, M.: Challenges in semiconductor technology for multi-megabit network services. Proceedings Intl. Solid-State Circuits Conference ISSCC (1998), S. 16–20.

[10] Neppl, F.: Schlüsseltechnik Mikroelektronik: Chancen und Herausforderungen. e&i 114 (1997), H. 9, S. 464–465.

[11] Noyce, R. N.: U.S. Patent 2981877, Apr. 25, 1961.

[12] Sasaki, H.: Multimedia: Future and impact for semiconductor technology. Proceedings Intl. Electron Devices Meeting IEDM (1997), S. 3–8.

[13] Semiconductor Industry Association. The National Technology Roadmap for Semiconductors, 1997.

[14] Special issue: 50th Anniversary of the transistor! Proceedings IEEE 86 (1998), No. 1, S. 1–308.