

Eine entscheidende Stunde

Für die Entwicklung des Charge-Coupled Device (CCD) erhalten Willard S. Boyle und George E. Smith den Physik-Nobelpreis 2009.

Hans-Joachim Queisser

„Alles, was Daten speichert oder schalten kann, das muss erforscht werden“ – dies war in den 60er-Jahren das Motto der Bell Laboratories mit dem Hauptquartier in Murray Hill, New Jersey (USA). In diesem beeindruckenden Forschungszentrum verbrachten Willard S. Boyle und George E. Smith, die sich eine Hälfte des diesjährigen Nobelpreises für Physik teilen, den Großteil ihrer beruflichen Laufbahn [1]. Willard (genannt Bill) Boyle leitete das „Semiconductor Device Laboratory“, sein Mitarbeiter George Smith die Abteilung „Device Concepts“. Beide hatten zunächst an Halbleitern Plasma-Effekte erforscht, bevor sie befördert und von der Grundlagenforschung zur „Halbleiterei“ versetzt wurden. Die damalige Silizium-Technologie litt noch stark unter meist metallischen Verunreinigungen der Silizium-Kristalle, und auch die technologisch wichtige Grenzfläche zwischen Silizium und Siliziumdioxid war noch nicht verstanden. Diese oft deprimierenden technischen Schwierigkeiten kannten



Alcatel-Lucent/Bell Labs

Willard S. Boyle (links) und George E. Smith 1974 mit einer Fernsehkamera, die

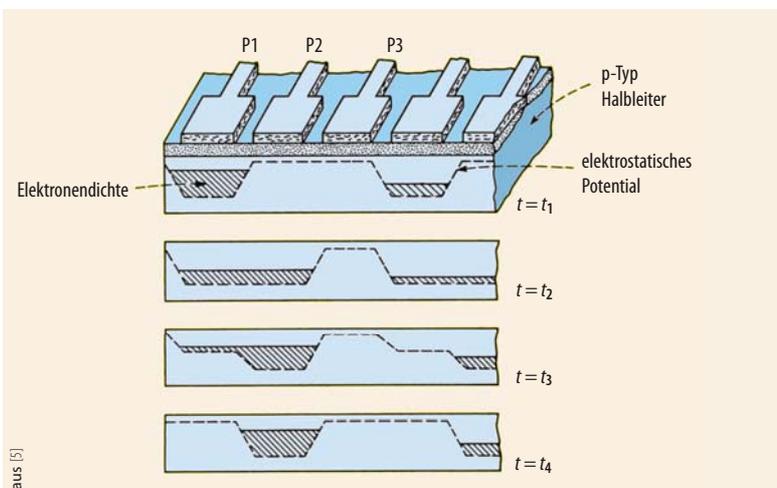
anstatt einer konventionellen Röhre ein CCD verwendet.

Smith und Boyle nicht aus eigener Laborerfahrung. Sie stiegen daher gewissermaßen mit einer „optimalen Ignoranz“ in dieses Gebiet ein und hatten keinerlei Hemmungen, an ganz neue, technisch schwierige Effekte zu glauben.

Dem erwähnten Motto entsprechend beschäftigten sich bei den Bell Labs damals viele Forscher mit der Entwicklung von magnetischen

Speichern, die einzelne Bits in magnetischen Domänen ablegen. Dabei entsprechen „0“ und „1“ unterschiedlichen Orientierungen der Magnetisierung. Im Gegensatz zu heutigen Festplatten sollte für das Speichern und Auslesen jedoch nicht ein Schreib/Lesekopf zuständig sein, der die einzelnen Domänen direkt ansteuert. Stattdessen sollte die Information nur an den Randidomänen eingespeichert werden und von dort in einem digitalen Schieberegister immer von einer Domäne zur nächsten weiterrücken bzw. beim Auslesen in umgekehrter Reihenfolge an den Rand geschoben werden. Dieses Prinzip ließ sich zwar realisieren, die benötigten Stromdichten, um die Domänen sukzessive umzuorientieren, waren für praktische Zwecke jedoch viel zu hoch.

Boyle und Smith aber meinten, dass ein solches Schieberegister auch mit elektrischen Ladungen in einem Halbleiter denkbar sei [2]. Die entscheidenden Ideen hierfür skizzierten sie in einem nur einstündigen Gespräch: Eine einzelne Speicherzelle wird dabei durch eine



In einem CCD erzeugen die Elektroden P1 etc. Potentialtöpfe in dem Halbleiter, in denen Ladungsträger gefangen sind. Durch veränderliche Spannungen an

den Elektroden lassen sich die Elektronen, die sich zum Zeitpunkt t_1 unter P1 befinden, bis zum Zeitpunkt t_4 unter P2 „schieben“.

Prof. Dr. em. Hans-Joachim Queisser, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart

Elektrode definiert, an der eine geeignete elektrische Spannung anliegt, sodass in dem Halbleiter unter der Elektrode ein Potentialtopf mit einer typischen Ausdehnung von $10\ \mu\text{m}$ entsteht. Sind Ladungen in dem Topf gefangen, entspricht dies einer digitalen „1“, keine Ladung repräsentiert eine „0“.

Durch eine geeignete Folge von Spannungspulsen lassen sich die Ladungen in drei Phasen von einem Topf in den nächsten takten und schließlich am Rand einer Zeile auslesen, ganz analog zu einer Eimerkette, mit der sich Wasser von einem Ort zu einem anderen transportieren lässt. Der Energiebedarf dafür ist sehr gering, dieses Konzept zu realisieren war angesichts der bereits erwähnten Probleme der damaligen Technologie aber sehr schwierig. Daher gab es zunächst nur eine einzelne Zeile, noch kein flächenhaftes Element. Das Problem ist, dass selbst kleine Defekte sofort die Eimerkette zusammenbrechen lassen. Bei Computerchips kann man die defekten Bauelemente aussortieren; im Ladungsspeicher aber braucht man

eine ganze perfekte Zeile oder sogar eine gesamte Fläche.

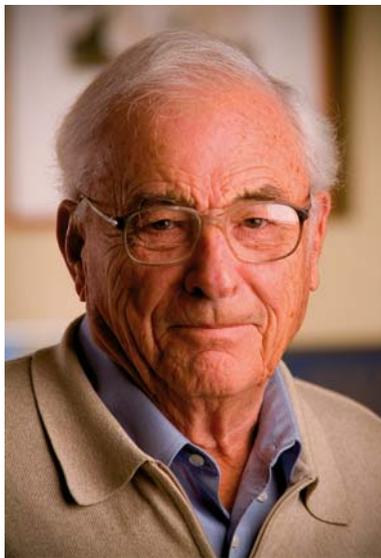
Boyle und Smith hatten zunächst primär daran gedacht, das Schieberegister als Speicher zu verwenden. In ihrer ersten Publikation erwähnten sie aber auch bereits die Möglichkeit, die Ladungsträger über den Photoeffekt zu erzeugen und dieses Bauelement für eine Videokamera einzusetzen. Im Gegensatz zum Speicher muss man dazu nicht nur eine „0“ oder „1“ speichern, sondern eine kontinuierliche Zahl von Ladungen, die der Stärke des einfallenden Lichts entspricht. In einem Potentialtopf können sich bis zu 10^5 Ladungsträger befinden, wobei sich bereits etwa 20 auslesen lassen. Dies bedeutet eine beachtliche Dynamik bzw. einen sehr hohen Kontrast eines solchen Charge-Coupled Device (CCD) von der Größenordnung 10^4 . Da ein Mitarbeiter von Boyle und Smith, Michael F. Tompsett (zusammen mit dem Kollegen G. F. Amelio) wichtige Beiträge zur Anwendung des CCDs in der Optik geleistet hat [4], begann in den USA unmittelbar nach der Nobelpreis-Erklärung eine

recht heftige Kontroverse um die mögliche Erfindungspriorität von Tompsett. Simon M. Sze, der damals ebenfalls in Boyles Labor arbeitete, hat die CCD-Entwicklung auf Silizium-Basis in einem hervorragenden Buch ausführlich beschrieben [5]. Für American Telephone und Telegraph, die Muttergesellschaft der Bell Laboratories, waren diese Bauelemente enorm wichtig für ein neuartiges Bildtelefon. In den 70er-Jahren war dieses allerdings zu teuer und noch nicht attraktiv genug, um sich durchzusetzen.

Geteiltes Interesse

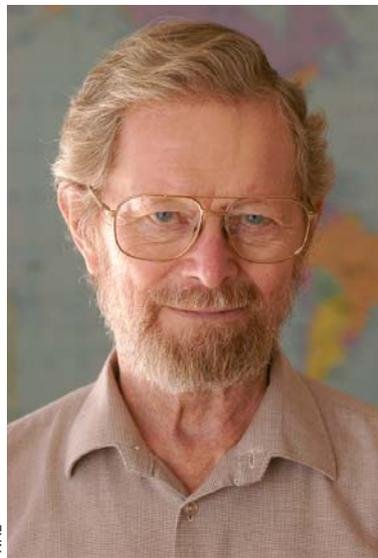
In Japan erkannten die Forscher und Entwickler von SONY Anfang der 70er-Jahre das Potenzial von CCDs für Digitalkameras. Dafür müsste ein gesamtes Bild in einem technologisch schwierigeren flächenhaften CCD als Ladungsverteilung gespeichert und seriell ausgelesen werden. Jeder noch so kleine Defekt würde dabei als weißer Punkt oder weißer Strich sichtbar. Eine kleine, aber enorm fleißige Gruppe unter der Leitung von Kazuo Iwama kämpfte über Jahre hinweg immer wieder mit Rückschlägen und war mehrfach kurz davor aufzugeben. 1980 schließlich wurde die erste CCD-Kamera (mit 120 000 Pixel) hergestellt, die angesichts der sehr geringen Ausbeuten allerdings noch unerschwinglich war. Es dauerte weitere fünf Jahre, bis mit einem Camcorder die Massenproduktion begann. Iwama hat diesen Erfolg nicht mehr erlebt, seinen Grabstein ziert einer der ersten CCDs von SONY [6].

In Deutschland waren meine Kollegen und ich in einer Gutachter-Kommission beim Bundesforschungsministerium der Meinung, dass vor allem Telefunken, aber auch Siemens oder die damals noch existierende Fernseh-GmbH (Darmstadt) sowie andere Firmen sich um diese neue Klasse von Halbleiter-Bauelementen bemühen und dafür gegebenenfalls auch eine Förderung erhalten sollten. Das Interesse der deutschen Industrie an dieser zweifellos riskanten und



NAE

Willard S. Boyle (geb. 1924) verbrachte einen Großteil seiner Kindheit in einer kanadischen Holzfällersiedlung, wo ihn seine Mutter unterrichtete. Sein Studium an der McGill Universität musste er kriegsbedingt für den Dienst in der Marine unterbrechen. Er promovierte 1950 und ging 1953 zu den Bell Labs, wo er sich u. a. mit dem ersten kontinuierlichen Rubinlaser und dem ersten Halbleiter-Injektionslaser beschäftigte. Seit seiner Pensionierung 1979 lebt er wieder in Nova Scotia.



NAE

George E. Smith (Jahrgang 1930) kam nach seiner Promotion an der University of Chicago 1959 zu den Bell Labs, wo er sich mit unterschiedlichen Fragen der Halbleitertechnologie beschäftigte. Nach seiner Pensionierung 1986 realisierte der begeisterte Segler seinen Traum einer Weltumsegelung.

sicherlich auch teuren Entwicklung blieb aber gering. Man könnte diese Bauelemente schließlich auch zu kaufen; der Markt hierzulande bei den modernen Kameras ging damit aber verloren. Immerhin gelang es in den 90er-Jahren am Stuttgarter Institut für Mikroelektronik unter seinem Leiter Bernd Höfflinger, mit einer modifizierten Technik Bauelemente mit extrem hoher Dynamik für deutsche und japanische Interessenten herzustellen.

Inzwischen sind Silizium-CCDs perfektioniert und in Digital- und Videokameras sowie Mobiltelefonen genauso unersetzlich wie in der hochempfindlichen Astronomie oder in vielen medizinischen Anwendungen. Für Anwendungen in anderen Spektralbereichen, etwa im nahen Infrarot, eignen sich Schmalband-Halbleiter oder auch Galliumarsenid. Angesichts dieser Bedeutung der CCDs hat das Nobelkomitee mit seiner Ent-

scheidung sicherlich Alfred Nobels letzten Willen erfüllt, Beiträge auszuzeichnen, die dem Wohl der Menschheit dienen. Dass der Preis erst jetzt an – inzwischen reichlich betagte Kollegen – vergeben wurde, hat jedoch zu Recht zu Kritik geführt. Und an den Einsprüchen von Tompsett und anderen zeigt sich, wie schwierig es ist, allen Mitgliedern einer Mannschaft gerecht zu werden.

- [1] Eine sehr detaillierte Aufstellung der Arbeiten an den Bell Labs gibt die Buchreihe „History of Bell Labs“, hrsg. von *F. M. Smits* et al., A&T Bell Labs (1985). Dort finden sich auch genaue Beschreibungen der vielen Nobel-gewürdigten Forschungen dieses großen Labors, das heute zum französischen Unternehmen Alcatel gehört.
- [2] *W. S. Boyle* und *G. E. Smith*, *Bell Syst. Tech. J.* **49**, 587 (1970)
- [3] *W. S. Boyle* und *G. E. Smith*, US Patent 3,792,322 (1974)
- [4] *M. F. Tompsett* in: *T. P. McLean* und *P. Schagen* (Hrsg.) *Electronic Imaging*,

Academic, New York (1979), S. 55

- [5] *S. M. Sze* und *Kwok K. Ng*, *Physics of Semiconductor Devices*, 3. Auflage, John Wiley, Hoboken, NJ (2007), Kap. 13

- [6] vgl. www.sony.net/Fun/SH/1-21/h1.html

DER AUTOR

Hans-Joachim Queisser ging nach seiner Promotion 1959 zunächst zu Shockley's Transistor Corporation, der Wiege des Silicon Valley



in Kalifornien, und wechselte 1965 zu den Bell Labs, wo George Smith sein direkter Vorgesetzter war. Zurück in Deutschland wurde er 1970 Gründungsdirektor des Stuttgarter Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung, dem er bis zu seiner Emeritierung 1998 angehörte. 1976/1977 war er DPG-Präsident.