Zeitschrift: Comtec : Informations- und Telekommunikationstechnologie = information and telecommunication technology

Herausgeber: Swisscom

Band: 81 (2003)

Heft: 10

Artikel: Weltspitzenleistung im Herzen Europas

Autor: Klipstein, Delano L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-876698

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: 16.07.2025

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

Halbleitertechnik

Weltspitzenleistung im Herzen Europas

200 GHz aus Prototyp-Fertigung, gleichsam ab Stange? Das ist kein Wunschtraum mehr. Wie kommt ein in der Forschung engagiertes Institut dazu, nicht nur Grundlagenarbeiten zu leisten, sondern diese auch gleich anwendungsnah und kommerziell zu vermarkten?

DELANO L. KLIPSTEIN

Dr. Wolfgang Mehr (Bild 1), der wissenschaftlich-technische Geschäftsführer des IHP («Innovations for High Performance Microelectronics», früher Institut für Halbleiterphysik) in Frankfurt an der Oder, erinnert sich: «Nach der politischen Wende war unser Motto: ‹Nicht das Gleiche machen, was andere auch schon tun›. So sind wir auf das damals noch exotische Silizium-Germanium (SiGe) als Halbleitermaterial gekommen, aber zunächst mit einer völlig anderen Zielsetzung. Man glaubte damals nämlich, das Material zum Leuchten bringen zu können und so einen neuen Einstieg in die Optoelektronik zu finden, also die Optoelektronik und Elektronik auf einem Chip zu vereinen. Die Idee war attraktiv, aber niemand hat das SiGe wirklich zum Leuchten gebracht, und so wurde diese Idee wieder fallen gelassen. Dann haben wir uns stärker den elektrischen Eigenschaften des SiGe zugewandt. Der Erfolg gab uns Recht. Wir realisierten diesen Erfolg nicht im Forschungsstübchen, sondern er war einsetzbar für künftige Hochfrequenzanwendungen im Millimeterwellenbereich. So mussten wir uns zwangsläufig auch mit den denkbaren Anwendungen auseinander setzen und nicht nur Halbleiterphysik betreiben. Die erzielbare Arbeitsgeschwindigkeit war hoch, das Rauschen deutlich geringer als bei Silizium.»

Die Suche nach der idealen Kombination

Schon früh hat man sich am IHP also auf das Thema «Silizium-Germanium (SiGe) mit Blick auf CMOS-Technologie» ausgerichtet. Das Potenzial einer solchen Technologie war klar. Es können Frequenzbereiche erschlossen werden, die für Silizium allein nicht offen stehen. Das kann zwar im Prinzip auch mit Galliumarsenid (GaAs) oder Indiumphosphid (InP) erreicht werden. Nur ist es ungleich schwieriger, diese beiden Materialien in eine kostengünstige Si-CMOS-Technologie zu integrieren. Si und Ge hingegen vertragen sich relativ gut miteinander. Der grosse Sprung nach vorn war aber die Idee, das weit gehend genutzte CMOS-Prinzip auch auf SiGe anzuwenden. Von Anfang an hat das IHP eine Abscheidung der beiden Stoffe angestrebt, die nicht auf die Molekularstrahlepitaxie setzt, sondern die viel kostengünstigere Chemical Vapor Deposition (CVD) nutzt. Das erarbeitete Know-how konnte man an den Produktionsgerätehersteller ASM verkaufen. Dort entstanden geeignete Fertigungsgeräte für die Herstellung des Materials.

Doch hundertprozentig passen auch Si und Ge nicht zusammen, obwohl sie aus der gleichen Hauptgruppe der Elemente des Periodischen Systems sind (nämlich IV). So suchte man nach einer Lösung, welche die Verträglichkeit der beiden Materialien noch verbessert. Man fand die Lösung zufällig an der Universität in Princeton: Kohlenstoff (C) (ein Element, das aus der gleichen Gruppe des Periodischen Systems kommt). Am IHP wurde der Effekt über Jahre systematisch untersucht. Weltweit war IHP der Erste, der SiGe:C einer industriellen Nutzung zugeführt hatte.

Dazu meint Dr. Bernd Tillack vom Process Research am IHP (Bild 2): «Viele Experimente waren nötig, um die optimale Dotierung (etwas unter 1%) mit Kohlenstoff herauszufinden. Der Kohlenstoff bringt in der elektrischen Leistungsfähigkeit gegenüber reinem Ge keinen neuen Vorteil. Der Gewinn aber liegt darin, dass das Prozessfenster bei der Verarbeitung weiter ist, man kann einfachere und billigere Prozesse fahren. Die Tür zu einer grosstechnischen Nutzung des altbekannten CMOS-Prozesses war weit aufgestossen.»

Wir fragten Wolfgang Mehr, wie man den am Institut gezeigten Spagat hinbekommt, einerseits die Materialkenntnisse weiter zu vertiefen und andererseits gleichzeitig neue Anwendungen zu erschliessen. Dazu meint Wolfgang Mehr: «Ein solcher Spagat ist machbar, wenn man auf ein spezielles Anwendungsgebiet mit hohem Potenzial fokussiert. Und das ist bei uns die drahtlose Kommunikationstechnik. Praktisch alle technologischen, schaltungstechnischen und sys-

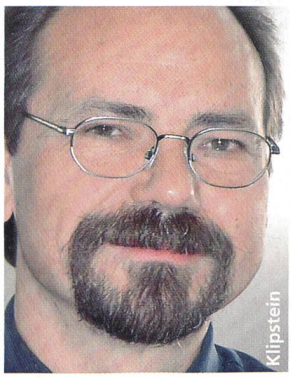

Bild 1. Dr. Wolfgang Mehr, wissenschaftlich-technischer Geschäftsführer des IHP in Frankfurt an der Oder.

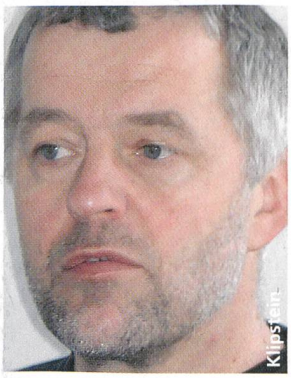

Bild 2. Dr. Bernd Tillack vom Process Research am IHP.

temtechnischen Kapazitäten am IHP sind auf dieses Marktsegment ausgerichtet. SiGe:C hat einen Reifestand erreicht, der als Standardtechnologie heute in die Hauptentwicklungsrichtung der drahtlosen Kommunikation eingeht. Davon hat das IHP vielfältig profitiert, beispielsweise durch Lizenzierung seiner Arbeiten an andere Unternehmen wie Intel, Motorola und Communicant in Frankfurt an der Oder.»
Die entscheidenden Schritte dabei waren sicher die CVD-Abscheidung des SiGe:C-Materials, die Reduzierung der Diffusion von Dotierungselementen durch den Einbau von Kohlenstoff und vielleicht auch noch eine spezielle Gestaltung des Emitters am Bipolar-Transistor. Eines scheint dem Geschäftsführer aber sicher: GaAs und auch InP als bisher «typische» Hochfrequenzmaterialien dürften weiter in Nischen abgedrängt werden. Nicht so sehr wegen mangelnder Leistungsfähigkeit, sondern vor allem weil die vom IHP entwickelten Herstellungsprozesse sehr günstige und leistungsfähige Bipolar-Transistoren lieferten (wenn man nicht gerade eine hohe Durchbruchspannung benötigt).

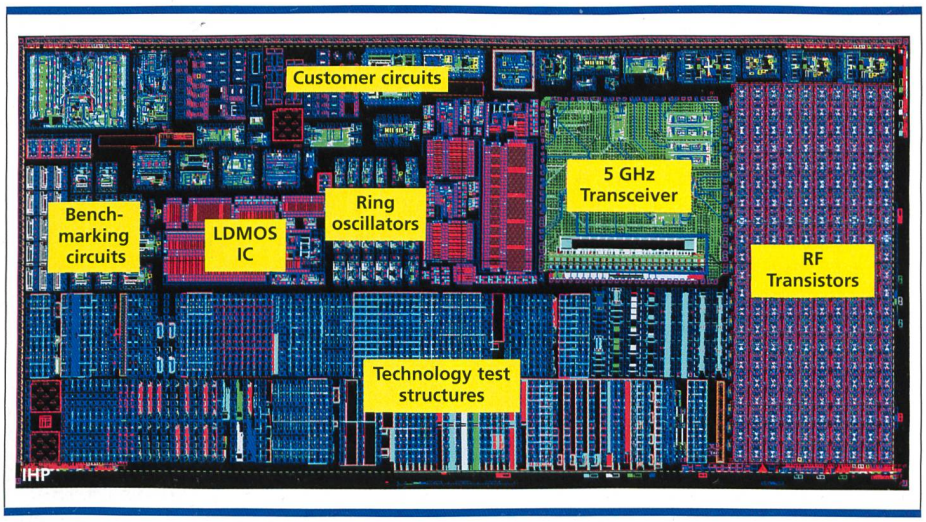

Bild 3: Ausschnitt aus dem Layout eines Multichipwafer, der am IHP prozessiert wurde.

Die Frage nach den Anwendungen
Was nützt die tollste Technologie, wenn man nicht klare Vorstellungen hat für ihren Einsatz? Gibt es denn neue Märkte für eine leistungsfähige und günstige BiCMOS-Technik? «Streaming Video» ist so ein typisches Gebiet. Im Jahr 1999 hatte das IHP ein Anwendungsszenario skizziert für seine 60-GHz-Transistoren, das unter anderem das Herunterladen von persönlichen Videos und Filmen auf kleine tragbare Geräte vorsah. Da braucht man Übertragungsraten bis zu 1 Gbit/s, um ein längeres Video in einer halben Minute im Speicher zu haben. Ein anderer potenzieller Markt ist die Bildverarbeitung im Auto, der Einsatz eines Autoradars zur Vermeidung von Auffahrunfällen. Das sind Massenmärkte, welche die Nachfrage stimulieren können.
Neben diesen beiden endverbrauchernahen Märkten gibt es noch eine weitere weltweit in Diskussion befindliche, technische Anwendung: die drahtlose Übertragung grosser Datenmengen auf einem einzelnen Chip. Über Aluminium- bzw. Kupferleitungen auf dem Halbleiterchip wird das nicht gehen: Die Leitungen sind zu lang. Im Millimeterwellenbereich bilden die unvermeidlichen parasitären Kapazitäten und die winzigen Leitungsinduktivitäten bereits Tiefpässe, welche die Übertragung grosser Bandbreiten bei hohen Frequenzen begrenzen.
Vor ein paar Jahren machte die Universität von Tallahassee (Florida) den Vorschlag, kleine Sender und Empfänger auf einem Chip zu integrieren, und löste damit viel Staunen und Unverständnis aus: Ein Chip, der in sich selbst Funkübertragung macht? Wie will man das technisch in den Griff bekommen? Und was gewinnt man dabei? Die Kritiker sind heute verstummt. Alle grossen Halbleiterhersteller beschäftigen sich mit dieser Frage.

Von der Physik zur Schaltungstechnik
Angenommen, wir wollten ein eigenes Halbleiterdesign in SiGe:C realisieren. Wie hilft da das IHP? Dazu der Geschäftsführer: «Wir stellen Ihnen unser Design Kit zur Verfügung und bieten Ihnen als erste Hilfe auch Entwurfsunterstützung an. Die Präparationsdauer liegt bei rund acht Wochen. Erste Muster oder kleine Stückzahlen bis hundert Stück können preisgünstig mit unseren Shuttle Services realisiert werden. Für grössere Stückzahlen bieten wir dann Wafer an, die vollständig mit Ihren Schaltungen belegt sind (Bild 3).» Und was kostet das? Die Preisliste gibt Auskunft: Wer den Shuttle Service nutzen möchte und mit f_T = 120 GHz zufrieden ist, zahlt für den mm² zwischen 3500 und 5000 €.
Benötigt man höhere Frequenzen, beispielsweise bis 200 GHz (Bild 4), dann wird es etwas teurer. Standardmässig arbeitet man am IHP mit 0,25-µm-Strukturen. Noch in diesem Jahr wird man 0,18 µm einführen. Und man sollte eines nicht vergessen: In der Produktion von BiCMOS-Schaltungen herrschen heute noch 0,35-µm-Strukturen vor. Motorola zum Beispiel arbeitet damit erst seit Anfang 2002.
Hochschulen und nichtkommerzielle Organisationen bekommen das alles etwas preiswerter. Ein Nachlass bis zu 40% wird gewährt, damit sie weiter forschen können. Beeindruckend ist das schon, 100 oder gar 200 GHz, gleichsam «von der Stange». Jetzt kann die Industrie daran gehen, die Abstandswarngeräte mit kostengünstiger SiGe-BiCMOS-Tech-

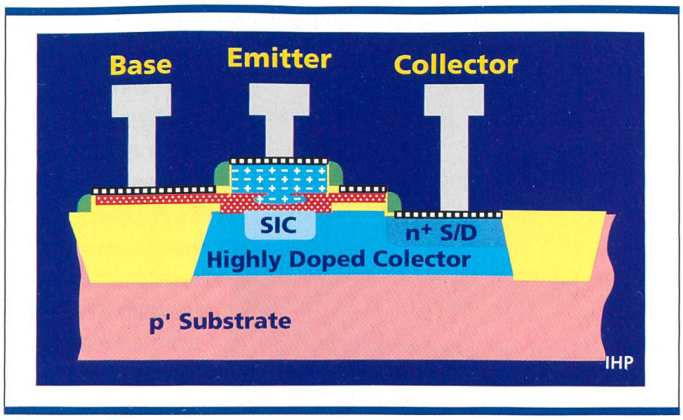

Bild 4. Schematischer Transistorquerschnitt des 200-GHz-Transistors (ein HBT mit Transitfrequenz f_T = 200 GHz) aus dem IHP.

nologie aus dem Versuchsstadium in den Einsatz zu bringen und Breitband-Internetanschlüsse in die Handys einzubauen. Am IHP hat man die 26 Ebenen für den Standard-Produktionsprozess SiGe:C als Herausforderung gesehen. Da Fotomasken sehr teuer sind, hat man im IHP nach Wegen gesucht, für besonders kostenempfindliche Hochfrequenz-Anwendungen die Maskenzahl zu senken. So gibt es heute für BiCMOS-Transistoren einen günstigeren Fertigungsprozess, der alle passiven Bauelemente schon einschliesst und dabei nur neunzehn Masken benötigt. Das ist eine erhebliche Minderung der Kosten, sowohl durch eine Minimierung beim technischen Aufwand als auch bei der Prozessdauer. Erkauft wird der Preisvorteil mit einigen Einschränkungen in den technischen Daten. Wer für seine Entwicklungen auf dem Hochfrequenzgebiet keine eigenen Kapazitäten hat, kann das IHP dafür beauftragen. Dort wird Forschung und Entwicklung auch als Auftragsarbeit geleistet. Von Communicant (dem künftigen Chip-Hersteller in unmittelbarer Nachbarschaft) hat man einen solchen F+E-Auftrag erhalten, mit einem Volumen von 18 Mio. € über die nächsten zweieinhalb Jahre. Damit ist etwa ein Drittel der Entwicklungskapazität gebunden. Wolfgang Mehr meint: «Es bleibt aber noch ausreichend Luft, um auch mit anderen zusammenzuarbeiten.»

Von der Schaltungstechnik zu den Systemen

Das IHP will die ganze Kette bis hin zu den Anwendungen abdecken, aber keine Geräte für den Endverbraucher bauen. Das überlässt man den eingeführten internationalen Firmen. So ist es kein Wunder, dass man am IHP auch Systemplattformen entwickelt. Die sollen beispielsweise ganze Aufbaublöcke realisieren, wie drahtlose Breitbandnetzwerke, mobile Datenverarbeitung oder ein drahtloses Internet. Das Vorzeigeobjekt ist hier die Kombination von allem auf einem Chip, das «Wireless Engine Project» (Bild 5).

Wir fragten Dr. Eckhard Grass: «Was machen Sie genau in dem Wireless Engine Project, das Ihr Aushängeschild ist? Wo stehen Sie da heute?» Grass zeigt Photos, Muster, Diagramme: «Das Projekt ist eine gemeinsame Plattform für unterschiedliche drahtlose Anwendungen. Der eigentliche Kern dieses Multi Purpose Project besteht aus einem Multiprozessor-Mixed-Signal-Chip mit einer Fläche von 60 mm² (ohne die Eingangs- und Ausgangsanschlüsse). Derzeit braucht dieser Kern etwa 1,5 W an elektrischer Leistung, aber da steckt noch Reduzierungspotenzial drin.

Da das IHP keine eigene Produktentwicklung macht, sondern auf der Metaebene den Herstellern zuarbeitet, ergibt sich eine interessante Frage: Werden die Arbeiten in der Abteilung eher durch physikalische Erkenntnisse getrieben oder durch sich abzeichnende Veränderungen in den Märkten?

Grass wirkt nachdenklich: «Beides spielt sicher eine Rolle und ist – mit wechselnder Bedeutung – auch Treiber. Wir Systementwickler sagen unseren Technologen, was wir gerne hätten, und die suchen es dann zu realisieren. Ein Beispiel sind die Flash-Speicher, die wir zur selbstständigen Rekonfiguration von Systemen haben wollen, und über die wir nun verfügen können. Wir sind uns sicher, dass auch MEMS in Zukunft eine grössere Rolle in der Systemtechnik spielen werden. Wir könnten uns zum Beispiel einen Einsatz von «Bulk Acoustic Wave Filters» vorstellen. Das könnte uns sehr effiziente Wellenfilter liefern, wie wir sie heute mit den gewünschten Parametern noch nicht integrieren können. So treiben wir die Technologie mit unseren Wünschen auf der einen Seite an, nutzen die Ergebnisse aber auch, um neue Systemeigenschaften zu erschliessen.»

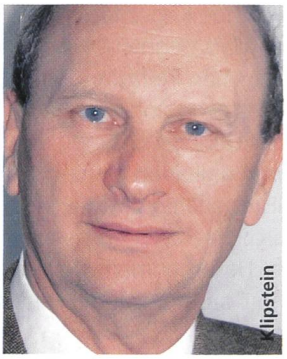

Bild 6. Dr. Hans-Joachim Müssig von der «Breakthrough»-Abteilung.

... und eine Abteilung, die für Durchbrüche sorgt

Was soll man sich unter einem «Breakthrough Department» vorstellen? Dr. Hans-Joachim Müssig (Bild 6) gab sich dem Besucher gegenüber nachsichtig: «Wer beim IHP eine ausgefallene, aber zukunftsträchtige Idee hat, kann diese bis zu zwei Jahre lang in unserer Abteilung vorantreiben. So haben wir zwar in dieser Abteilung immer eine gewisse Fluktuation, aber wir sind ein Inkubator für neue Ideen. Läuft es dann, können die Idee und die ersten Ergebnisse in ein Start-up-Unternehmen eingebracht werden. Oder wir können beschliessen, es selbst weiterzuentwickeln, wenn es in unser Spektrum passt. Die Bedingung ist nur, dass wir für ein bestehendes Problem einen eigenen, nicht ausgetretenen Weg suchen. Er muss zu besseren Ergebnissen führen als Lösungswege, die schon beschritten wurden. Nehmen wir die so genannten «High-k»-Materialien. Dabei handelt es sich um eine neue Materialgruppe, die bei den Chips das klassische SiO_2 als Dielektrikum für die Isolierschicht der Gate-Elektrode ablösen soll. Mit der Verkleinerung der Transistoren sind auch die SiO_2-Schichten immer

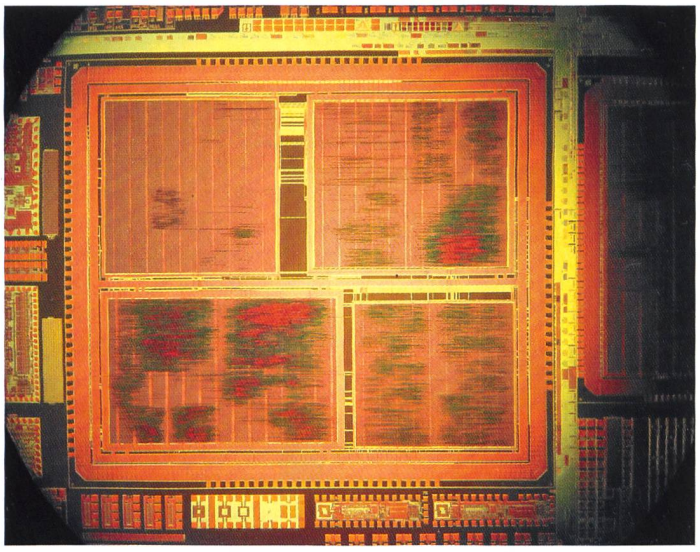

Bild 5. Kompletter OFDM-Basisbandprozessor (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) mit Hardware Accelerator zur MAC-Protokollverarbeitung als Kern der «Single Chip Wireless Engine».

dünner geworden. Gate-Isolierungen sind heute etwa zehn Atomlagen dünn. In etwa vier Jahren wird man an die physikalischen Grenzen stossen. Wenn man nichts tut für eine bessere Isolierung, dann wird man die Leckströme nicht mehr beherrschen können. Die Transistorentwicklung wäre am Ende. Der Ausweg liegt in einem besseren Isoliermaterial, und das hat eine höhere Dielektrizitätskonstante k.»
Doch auch andere Schaltungsteilen auf einem Chip profitieren von einem hohen k. Da wäre beispielsweise die Verkleinerung von DRAM-Speicherzellen: Verkleinert man den Speicherkondensator der Zelle geometrisch, dann wird auch seine Kapazität kleiner. Das ist elektrisch nicht zu verkraften, weil die Anfälligkeit für Alpha-Partikel steigt. Die wiederum führen zu den so genannten «Soft Errors»: Da werden dann ungewollt Daten im Speicher überschrieben – eine Horrorvorstellung für alle Anwender. Also muss man ein Kondensatormaterial finden, das eine höhere Kapazität erzeugt, und dieses Material hat eben eine höhere Kapazitätskonstante. Darum sind Alternativmaterialien mit hohem k gefragt.
Unter den bislang untersuchten Materialien sieht es so aus, als ob Hafniumoxid (HfO_2) ein viel versprechender Kandidat sein könnte. In anwendungsnahen Prozessen hat man damit bereits k-Werte von 20 bis 25 erreicht. Doch es gibt auch ein Problem: Da das Material in direktem Kontakt mit dem Silizium arbeiten muss, braucht es gute «Interface»-Eigenschaften zur Siliziumoberfläche. Bei dem klassischen SiO^2 war das kein Problem, weil SiO^2 ja eine Siliziumverbindung ist, mit allen Grundeigenschaften des Trägermaterials. Und da wird man bei HfO_2 noch einiges tun müssen. Noch hat niemand solche Materialien mit grosser Dielektrizitätskonstante in einen existierenden Fertigungsprozess eingebracht.
Das IHP wollte – getreu seiner Philosophie – nicht auf einen fahrenden Zug aufspringen und suchte nach einer Alternativlösung. So begann man sich im April 2000 nach einem weiteren Material auszuschauen, an dem andere nicht arbeiteten. Und man konzentrierte sich auf Praseodymoxid (Pr_2O_3). Das Element Praseodym gehört zu den so genannten «Seltenen Erden» im Periodischen System der Elemente, wie die besser bekannten Elemente Neodym oder Erbium auch. Es ist aber gar nicht so selten wie der Name sagt. Und es passt gut zu Si, wie die Experimente bisher zeigten. Pr_2O_3 wächst kristallin auf, als Einkristall in kubischer bzw. hexagonaler Form. Die optische Industrie nutzt dieses Material seit langem für die Vergütung von Objektiven. Es ist auch nicht übermässig teuer.

Man hat am IHP damit ein k = 30 realisiert – weit höher als mit anderen bisher bekannten Materialien. Praseodymoxid wurde am IHP bereits auf 100-mm-Wafern in technologisch relevanten Schichten aufgewachsen. Und in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität in

Bild 7. Das im Jahr 1999 in Betrieb genommene neue Institutsgebäude kann sich mit einschlägigen Halbleiterstandorten in der Welt messen.

Das IHP in Frankfurt an der Oder

Das IHP (Bild 7) liegt in einem Industriepark, die Autobahn gleich nebenan, ein paar Kilometer vor der Stadt Frankfurt. Und es sieht so aus, wie Hightech-Standorte in Kalifornien oder Japan heute aussehen: funktional und kühl, hell und lichtdurchflutet, aus Glas und Stahl. Auch die Menschen ähneln denen, die man an solchen Orten zu treffen pflegt: Manager der mittleren und jüngeren Generation in Pullovern, ein paar Ältere als Erfahrungsträger. Seine Aufgabe sieht das IHP in der «Entwicklung von Innovationen, die in Zukunft zu einer Technologierevolution führen können». Knapp 200 Mitarbeiter haben dafür einen Etat von rund 25 Mio. € jährlich zur Verfügung. Das ehrgeizige Ziel wird auf verschiedenen Wegen angegangen. Sechs wissenschaftliche Abteilungen gruppieren sich um eine rund um die Uhr betriebene 8-Zoll-BiCMOS-Prozesslinie. Und hier steht im Vordergrund die in Frankfurt entwickelte SiGe:C-Technologie, die den produktionsnahen Sprung in den Bereich von 100 GHz und mehr ermöglicht hat.
Im Dezember 2003 feiert das IHP sein 20-jähriges Bestehen. Das heutige Institut entstand 1991 aus dem früheren Akademieinstitut. 1999 bezog man einen grosszügigen Neubau mit angegliedertem Reinraum, in dem auch kleine Vorserien für einen Kunden gemacht werden können. Das IHP pflegt heute die internationale Zusammenarbeit mit mehr als dreissig Firmen weltweit, darunter so prominente Namen wie Intel, Siemens, Infineon Technologies, Wacker, Philips und Sennheiser.

IHP, Im Technologiepark 25, D-15236 Frankfurt an der Oder
Tel. +49-335-5625 0, Homepage: www.ihp-microelectronics.com

Darmstadt wurden schon erste funktionierende MOSFET damit aufgebaut.
In der technischen Umsetzung wird es noch weitere Fragen geben. Ein ungelöstes Problem bei allen High-k-Materialien ist eine gewisse Instabilität beim Betreiben des Bauelements. Die Schwellenspannung im Transistor verändert sich bei High-k-Material, wenn man die Betriebsspannung anlegt. Für analoge Schaltungen wäre das eine kleine Katastrophe, weil damit alle Kennlinien ins Rutschen kämen. Da werden die Schaltungs-Designer gefragt sein, die fehlertolerante Lösungen finden müssen.
Der ärgste Feind von High-k-Material aber könnte die Halbleiterindustrie selbst sein: Alles, was aus dem gewohnten Arbeitsfeld herausfällt, stösst da auf Misstrauen. Weil neue Fertigungsgeräte in der Halbleitertechnik kleine Vermögen kosten, fürchtet man nichts so sehr, wie die Einführung unbekannter Materialien, Technologien und neuer Geräte.
Aber der Kern der Aktivitäten am IHP dreht sich um die SiGe-Technologie. Weil man sich da an der Weltspitze sieht, hatte man im Januar dieses Jahres in Nagoya (Japan) gemeinsam mit der japanischen Tohoku-Universität Sendai die erste SiGe-Konferenz der Welt durchgeführt – mit grossem Erfolg. Im nächsten Jahr soll schon die nächste Konferenz folgen. Wo? In Frankfurt an der Oder natürlich. 10

Delano L. Klipstein,
Fachjournalist, Münche

Summary

Leading World Performance in the Heart of Europe

200 GHz from prototype assembly and at the same time off-the-peg? That is no longer just wishful thinking. How does an institution engaged in research come to not only carry out the groundwork but also market this practically and commercially? The IHP in Frankfurt an der Oder started developing silicium germanium (SiGe) as a CMOS technology at an early stage. This enables frequency ranges to be opened up that were not possible with silicium alone. However, the crucial step forward was the idea of also applying the widely used CMOS principle to SiGe. Further consolidating material knowledge while at the same time opening up new applications can be achieved by focusing on a special area of application with a high potential. For IHP this is wireless communication technology.