



innovations
for high
performance

microelectronics

Schlussbericht zum Verbundprojekt:

Materialien für extrem hohe integrierte Kapazitäten (MaxCaps)

Teilprojekt: Präparation und Charakterisierung von MIM-Kondensatoren

Ausführende Stelle: IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik

FKZ: 13N9926

Projektleiter des Teilvorhabens: Dr. habil. Christian Wenger

I. Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung

Ein häufig verwendetes Bauteil sind in der Automobilelektronik Kondensatoren, sei es als Block-Kondensatoren oder Analog-Kondensatoren. Diese Kondensatoren sind aufgrund der notwendigen Kapazitäten bisher als diskrete Bauteile, in der Regel SMD, ausgeführt, die auf der Systemplatine mit entsprechendem Flächenverbrauch montiert werden. Um die benötigte Fläche zu reduzieren, können mehrere dieser diskreten Kondensatoren in Chips mit hoher Integrationsdichte integriert werden. Dazu sind jedoch integrierte Kondensatoren mit sehr hohen spezifischen Flächenkapazitäten ($C_f = C/A$ [fF/ μm^2]) notwendig.

Eine höhere Flächenkapazität würde eine höhere Integrationsdichte erlauben, was die Halbleiterbauteilfertigung wirtschaftlicher und energieeffizienter macht. Gleichzeitig resultiert bei herkömmlichen Dielektrika aus der zur Maximierung der Kondensatorkapazität notwendigen Verringerung der Schichtdicke und der Erhöhung der Kondensatorfläche ein signifikantes Anwachsen des Leckstroms durch das Dielektrikum und damit des Stromverbrauchs des Bauteils.

In diesem Verbundprojekt hatten sich Conti Temic (Automobilelektronikhersteller), Infineon (Halbleiterhersteller), Aixtron (Abscheideanlagenhersteller), und die KMU R3T (Plasmaquellen) unterstützt durch das Leibniz-Institut IHP zusammengeschlossen, um auf Basis neuer Materialien innovative integrierte Kondensatoren zu entwickeln und die Umsetzung des Entwicklungsziels anhand von produktnahen Demonstratorbauteilen für die Automobilelektronik nachzuweisen.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung hochleistungsfähiger und in Silizium integrierbarer Kondensatoren auf der Basis neuer Materialien mit hohen Dielektrizitätskonstanten, die für eine zuverlässige Automobilelektronik eingesetzt werden können.

Um das ambitionierte Projekt zum Erfolg zu bringen, wurde es in ein Europäisches Konsortium im Rahmen des MEDEA+ Programms eingebunden. Das Ziel war, die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Firmen (mit Hilfe der Kompetenz des Leibniz-Institutes IHP) in einem schwierigen und anspruchsvollen Umfeld zu stärken.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt hatte eine Laufzeit von 3 Jahren (01.09.2008 – 31.08.2011). Das Volumen des Teilprojektes „Präparation und Charakterisierung von MIM-Kondensatoren“ betrug 584.132,- Euro. Davon entfielen

447.453,- Euro für Personalausgaben

11.000,- Euro für Fremdaufträge

108.350,- Euro für allgemeine Verwaltungsausgaben

17.329,- Euro für Dienstreisen

Für die Durchführung des Projektes erwies es sich als außerordentlich hilfreich, die langjährige Kompetenz der Abteilung „Materials Research“ des IHPs auf dem Gebiet der Hoch-k Materialien nutzen zu können. Zur Abteilung gehörten zum Beginn des Vorhabens 10 Experten auf diesem Gebiet an, deren Expertise durch zahlreiche Publikationen und erfolgreiche Durchführungen von Projekten gezeigt wurde:

- MEGA EPOS-Projekt (Förderkennzeichen BMBF 13N9261): Metall-Gate-Elektroden und epitaktischen Oxiden als Gate-Stacks für zukünftige CMOS-Logik- und Speichergenerationen
- Bilaterales Projekt mit Infineon/Qimonda: Hoch-k-Materialien für DRAM
- Bilaterales Projekt mit AIXTRON: Hoch-k Materialien für MIM-Kondensatoren

Die Materialforschung am IHP hatte die Suche nach neuen alternativen dielektrischen Materialien, deren Charakterisierung und Optimierung sowie Integration in technologische Prozesse zum Inhalt, um verbesserte bzw. neuartige Funktionalitäten in zukünftigen Bauelementen zu erreichen. Im Fokus der Arbeiten standen neue Hoch-k-Dielektrika für Anwendungen in MIM-Kondensatoren, Speichern und Transistoren, sowie als Epitaxievermittler für hochwertige heteroepitaktische Halbleiterschichten (SIS-Schichtstapel).

Metall-Isolator-Metall (MIM)-Kondensatoren sind wichtige passive Bauelemente in Radiofrequenz (RF)- und integrierten Schaltungen (IC). Der Ersatz der konventionellen Materialien SiO_2 und Si_3N_4 durch Hoch-k-Dielektrika ist notwendig, um im Zuge der weiteren Miniaturisierung die Kapazitätsdichte zu erhöhen.

MIM-Kondensatoren mit Pr_2O_3 als Dielektrikum zeigten k -Werte von ~ 15 , jedoch war die Leckstromdichte nicht für RF-Anwendungen geeignet. Deshalb wurden folgender Ansatz gewählt: Der Pr_2O_3 -Film wurde zwischen zwei Schichten des Weitband-Isolators Al_2O_3 eingebettet. Neben der Erhöhung der elektrischen Barrierehöhe, sollte der obere Al_2O_3 -Film zugleich als Schutzschicht wirken, um die Pr_2O_3 -Schicht gegenüber Luftfeuchtigkeit zu schützen. MIM-Kondensatoren mit dem Schichtstapel $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ waren aussichtsreiche Kandidaten, um die Anforderungen der damals aktuellen ITRS zu erfüllen. Das IHP entwickelte so einen neuen Hoch- k -MIM-Stapel mit einer großen Kapazitätsdichte von $5.7 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$, einer kleinen Leckstromdichte von $5 \times 10^{-9} \text{ A}/\text{cm}^2$ bei 1V und minimalen dielektrischen Verlusten im untersuchten Frequenzbereich.

MIM-Kondensatoren mit $\text{Pr}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ als Dielektrikum zeigten parabolische $C(V)$ -Kurven mit positivem Vorzeichen. Der quadratische Spannungskoeffizient der Kapazität konnte durch die Kombination von $\text{Pr}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ und SiO_2 in einer geschichteten MIM Struktur reduziert werden. Der SiO_2 -Film beeinflusste sowohl die Leckstrom-Charakteristik als auch das dielektrische Durchbruchverhalten. Auf Grund des kleinen k -Wertes von SiO_2 war die resultierende Kapazität reduziert. Deshalb sollte die Schichtdicke des Oxidfilms so dünn als möglich gehalten werden. Die geschichteten $\text{SiO}_2/\text{Pr}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ -MIM Kondensatoren zeigten hervorragende elektrische Eigenschaften. Der quadratische Spannungskoeffizient α der Kapazität und der Leckstromparameter erfüllten die Anforderungen der damals aktuellen ITRS. Für MIM-Kondensatoren mit einer Kapazitätsdichte von $3.2 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ betrug die auf eine Lebensdauer von 10 Jahren extrapolierte Betriebsspannung 3 V.

Die Ursache des nichtlinearen Kapazitäts-Spannungs $C(V)$ -Verhaltens von MIM-Kondensatoren mit Al_2O_3 -, Y_2O_3 -, HfO_2 - und $\text{Pr}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ -Dielektrika wurde untersucht.

Basierend auf dem elektro-optischen Kerr-Effekt, wurde ein physikalischer Ausdruck für den quadratischen Spannungskoeffizienten α abgeleitet. Mit Hilfe von experimentell ermittelten intrinsischen Parametern ist es mit Hilfe des Modells möglich, die kritische Schichtdicke für jedes Hoch- k -Material zu bestimmen, bei der α kleiner als der erforderliche Wert von 100 ppm/V^2 bleibt. Mit Kenntnis der kritischen Schichtdicken war es ebenfalls möglich, die maximal mögliche Kapazitätsdichte für die Hoch- k -Materialien zu berechnen. Kapazitätsdichten von $4 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ können durch den Einsatz von Hoch- k -Materialien anstelle von SiO_2 erreicht werden, und die Kondensatorfläche kann um einen Faktor 2 reduziert werden.

Seit 2005 werden am IHP sowohl Hoch- k -Dielektrika, wie z. B. Sr-Ta-O and HfO_2 , als auch Metallelektroden (TiN) in einer Drei-Kammer AVD Anlage der Firma AIXTRON abgeschieden.

Die elektrischen Eigenschaften der mittels AVD gewachsenen MIM-Kondensatoren wurden intensiv untersucht. Sr-Ta-O basierte MIM-Kondensatoren weisen eine Kapazitätsdichte von $5.5 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ in Kombination einer ITRS-konformen Linearität auf.

3. Planung und Ablauf

Aus dem Gesamtvorhaben des Verbundprojektes lassen sich vier Teilziele für das IHP extrahieren:

- Entwicklung und Optimierung der Abscheidung von Isolatoren mit ultrahoher Dielektrizitätskonstante (UHK)
- Integration und Charakterisierung der UHK- und Elektrodenschichten
- Überführung der Ergebnisse auf Infineon ALD Anlage

Die Entwicklung und Optimierung der mittels AVD abgeschiedenen UHK Filme stand im Mittelpunkt der ersten Phase des Projektes. Die Herausforderung lag dabei in der gleichzeitigen Erfüllung der Spezifikationen des Projektpartners Infineon für die Flächenkapazitäten und die Durchbruchfeldstärken.

Hierzu wurden dielektrische Perowskit-Schichten der Kombination ABO_3 (A: Kation 1, B: Kation 2, O: Sauerstoff) und Perowskit-verwandte Strukturen der Form $\text{A}_x\text{B}_2\text{O}_{5+x}$ mit $1 \leq x \leq 6$ mittels AVD auf vorpräparierten planaren Elektrodensubstraten abgeschieden. Zudem war eine thermische Nachbehandlung der ABO_3 und $\text{A}_x\text{B}_2\text{O}_{5+x}$ Schichten beabsichtigt.

Die Elektrodensubstrate wurden anfänglich von Infineon zur Verfügung gestellt. Als Elektrodenmaterial wurde TiN und TaN bevorzugt. Das IHP konnte zudem AVD TiN- und planarisierte Wolfram-Schichten herstellen und als Elektrodensubstrate testen und den Partnern zur Verfügung stellen. Zudem wurden Ruthenium-Schichten, die vom Projektpartner Aixtron präpariert wurden, als Elektrodenmaterial untersucht werden.

Die abgeschieden Schichtstapel, bestehend aus einer UHK- und Elektroden-Schicht wurden methodisch analysiert. Als Charakterisierungsmethoden wurden Röntgendiffraktometrie

(XRD), Röntgenreflektion (XRR), Transmissionselektronen-Mikroskopie (TEM), Photoelektronenspektroskopie (XPS), Rasterelektronen Spektroskopie (REM), Flugzeit Sekundärionen Massen Spektrometrie (TOF-SIMS) und Auger Elektronen Spektroskopie (AES) angewandt.

Zudem wurden durch lithographiefreie Präparationen einfache Metall-Isolator-Metall (MIM) Strukturen hergestellt, die zur elektrischen Charakterisierung benötigt werden. Die gemessenen Strom-Spannungs- und Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien wurden zur Evaluierung der elektrischen Parameter benötigt. Die extrahierten elektrischen und analytischen Parameter wurden zur weiteren Optimierung der Abscheidebedingungen benötigt.

Aixtron hat die Abscheidungen im IHP durch intensive Prozeßunterstützung begleitet. Dabei wurden die technisch-physikalischen Grundlagen für einen späteren Produktionsprozess bei Infineon erarbeitet.

In der zweiten Projektphase wurden die von den Projektpartnern entwickelten und abgeschiedenen Dielektrika und Elektroden in Teststrukturen von Infineon und Demonstrator-Bauteile integriert. Dabei wurde teilweise die Entwicklung von neuen Prozessen (z.B. Plasmaätzen) notwendig. Im IHP wurden Vorversuche zur Strukturierung der UHK / Elektrodenstrukturen mittels Flur-basierter plasma-unterstützter Ätzprozesse durchgeführt. Die grundlegenden Parameter der Prozesse: Ätzrate und Selektivität konnten evaluiert werden.

Zusammen mit dem Partner Infineon wurden die Bauteile zudem elektrisch charakterisiert und hinsichtlich der geforderten Spezifikationen bewertet. Mittels der Kapazitäts-Spannungs-Kennlinien ließen sich neben der dielektrischen Konstante weitere Parameter ableiten, die wichtige Kenngrößen für die Qualität des UHK-Kondensators repräsentieren. So ließ sich aus den dielektrischen Verlusten bei kleinen Frequenzen Rückschlüsse über innere Reibungen im Dielektrikum schließen. Begleitend zu den elektrischen Messungen wurden am IHP einfache Ersatzschaltkreise simuliert, um das Verständnis der Kennlinien des UHK-Kondensators zu fördern und in einem weiteren Schritt zu verbessern.

Die Abscheideprozesse der am meisten geeigneten Materialien wurden in der letzten Phase auf eine bei Infineon vorhandene ALD-Anlage transferiert. Die Analytik und Charakterisierung der Schichten geschah am bzw. zusammen mit dem IHP.

4. Wissenschaftlichen und technischen Stand, an dem angeknüpft wurde

Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden integrierte Kondensatoren für Halbleiterschaltungen mit etablierten Dielektrika gefertigt. Diese Dielektrika (SiO_2 , Si_3N_4 und kombinierte Schichtsysteme aus beiden) zeigen aufgrund ihrer niedrigen Dielektrizitätskonstanten (3,9 bzw. 6 – 7) Begrenzungen bezüglich der mit ihnen erreichbaren spezifischen Flächenkapazitäten. Der aktuellen technologischen Forderung nach höheren Flächenkapazitäten kann mit diesen herkömmlichen Dielektrika daher nicht mehr entsprochen werden.

Perowskit-Dielektrika waren lange Zeit Gegenstand der Forschung. Dabei standen bisher vor allem Anwendungen in Speicherkonzepten, wie z.B. FeRAM mit Materialien wie PZT ($\text{PbZr}_{1-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$) und SBT ($\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$) im Vordergrund. Das dabei generell eingesetzte Abscheidungsverfahren sind PVD und MOCVD. Diese Verfahren bieten jedoch nur eine sehr eingeschränkte Abscheidekonformität. Die Abscheidung über MOCVD wurde vor allem im Zeitraum von 1998 bis 2001 (z.B. VLSI Conference 1999: 3 Artikel, 2000: 3 Artikel, 2001: 1 Artikel) erforscht. In der Folgezeit wurde es still um das Thema und Dielektrika mit niedrigeren Dielektrizitätskonstanten, wie Al-, Hf- und Zr-Oxide in Verbindung mit Strukturen mit sehr hohem Aspektverhältnis rückten in den Fokus des Interesses.

Eine Anwendung von Perowskit-Dielektrika, insbesondere SrTiO_3 , BaTi_4O_9 , SrTa_2O_6 in MIM-Kondensatoren wird erst in letzter Zeit beschrieben, hier allerdings aufgrund der schlechten Abscheidekonformität nur in planaren Kondensatoren [S. Park, Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) 2456, K. Morito et al., J. Ceram. Soc. Jpn. **110** (2002) 408, B. Yang et al., Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 112902, S. Regnery et al., J. Appl. Phys. **97** (2005) 073521].

Inzwischen befindet man sich in der Situation, zur weiteren Hochskalierung der Flächenkapazitäten UHK-Materialien in diesen dreidimensionalen Strukturen abscheiden zu müssen. Bisher sind nur wenige Veröffentlichungen über die Abscheidung über Perowskit-Dielektrika mittels ALD erschienen. Verschiedene Arbeitsgruppen in Korea haben nun begonnen, Artikel über ALD-Abscheidungen dieser Materialien zu veröffentlichen [W. Lee et al., Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 6941].

Die Verfügbarkeit geeigneter Precursoren für diese Perowskit-Dielektrika spielt eine Schlüsselrolle. Soweit dem Konsortium bekannt war, waren zum Projektstart keine für das AVD-Abscheidungsverfahren dieser Materialien optimierte Precursoren auf dem Markt verfügbar.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des beantragten Projektes wurden neuartige UHK Materialien untersucht. Die dazu benötigten Precursoren mussten größtenteils neu entwickelt werden. Die primären Untersuchungen zu AVD Abscheidungen mit den neuen Precursoren wurden als Fremdleistung an der Universität Vilnius in Litauen vorgenommen.

Die industriellen Partner des europäischen MEDEA+ Konsortiums waren:

Name	Country	Address
ASM International	NL	NL-3723BC Bilthoven
Air Liquide	FR	F- 78350 Les Loges en Josac
Aixtron AG	GE	52146 Aachen
Bronkhorst	NL	NL-7261AK Ruurlo
Conti Temic Microelectronic GmbH	GE	90411 Nürnberg

Infineon Technologies	GE	D-93049 Regensburg
NXP Semiconductors	BE	B-3001, Leuven
NXP Semiconductors	NL	NL- 5656 AE, Eindhoven
Oxford Instruments	UK	Yatton, BS49 4 AP
R3T GmbH	GE	82024 Taufkirchen
SAFC Hitech (Epichem, Ltd)	UK	Wirral, CH62 3QF
STMicroelectronics	FR	F-38926 Crolles & 37000 Tours

Die europäischen Partner-Institute und Universitäten des MEDEA+ Konsortiums waren:

Name	Country	Address
CEA-LETI	FR	F- 38054 Grenoble CEDEX 9
IHP	GE	15236 Frankfurt (Oder)
IMEC	BE	B-3001, Leuven
Technical University of Eindhoven	NL	NL-5612 AZ Eindhoven
Tyndall National Institute	IE	Cork
Univ. of Helsinki	FI	FI 00014 Helsinki

II. Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Projekt startete am 01.09.2008. Das zugehörige Kick-off Meeting fand am 12.11.2008 beim Projektkoordinator Infineon Technologies in Regensburg statt. Die Abstimmung der folgenden Schritte wurde durch zweiwöchige Telefonkonferenzen kommuniziert.

Die Arbeitspakete und deren Teilaufgaben sind in dem folgenden Balkenplan zeitlich aufgelöst dargestellt:

Arbeitspakete und Teilaufgaben	1. Hj	2. Hj	3. Hj	4. Hj	5. Hj	6. Hj
Entwicklung und Optimierung der UHK Abscheidung						
Abscheiden der Elektrodenschichten						
Abscheiden der UHK Schichten						
Analytische Charakterisierung						
Elektrische Charakterisierung						
Integration und Charakterisierung der UHK und Elektrodenschichten						
Analytische Charakterisierung						
Elektrische Charakterisierung						
Maskenentwurf						
RIE-Ätzversuche zur Integration						
Überführung der Ergebnisse auf Infineon ALD Anlage						
Analytische Charakterisierung						
Präparation einfacher Teststrukturen						
Elektrische Charakterisierung						
Prozessierung und Charakterisierung des Demonstrator-Bauelementes						
Unterstützung zur Integration						
Zuverlässigkeitsuntersuchung						
Kontaminationsstudien						
Hochfrequenzmessungen						

Die Entwicklung und Optimierung neuartiger UHK Schichten stand im Mittelpunkt des Arbeitspakets 2. Die Abscheidungen und Untersuchungen des Perowskitmaterials $Sr_xTa_yO_z$ auf TiN und TaN (Substrate vom Projektpartner Infineon) wurden begonnen. Der Einquellenpräkursor des Medea+-Projektpartners Sigmar-Aldrich wurde installiert und eingefahren. Zunächst wurden die Abscheideparameter (Druck, Pulslänge, Öffnungszeit des Injektors) evaluiert und optimiert und die jeweiligen Abscheideraten durch begleitende Analysen bestimmt. Durch eine einfache Teststrukturpräparation wurden die elektrischen Eigenschaften der 30 bis 90 nm dicken Filme vorcharakterisiert. Mittels des Einquellenpräkursoren von Sigmar-Aldrich konnten moderate dielektrische Konstanten (DK)

von ca. 30 erreicht werden, die Leckstromdichten liegen im angestrebten Bereich von 10^{-8} A/cm². Durch thermische Belastung kann die DK auf ca. 50 erhöht werden. Die Optimierung der Parameter bei Abscheidetemperaturen unterhalb 400 °C ist im Gange. Durch analytische Untersuchungen mittels XPS und AES wird das Verständnis der Filmeigenschaften erhöht und deren Optimierung beschleunigt.

Die Abscheidungen der SrTaO Schichten unter Verwendung des von SAFC bereitgestellten Prekursors wurden 2009 fortgeführt. Dabei wurden die Prozessparameter Temperatur des Verdampfers und Kammerdruck variiert. Trotz der Prozessvariaationen blieb die Stöchiometrie der abgeschiedenen Filme konstant:

Sr: 21% Ta: 10% O: 59% C: 10%

Zur Erhöhung des Ta-Anteils in den SrTaO Filmen wurde ein zusätzlicher Ta-Prekursor von SAFC installiert. Die bei 400 °C gewachsenen TaO_x-Filme sind zunächst amorph und beginnen bei 800 °C zu kristallisieren. Trotzdem war die Co-Injektion beider Prekursoren nicht erfolgreich, da die Stöchiometrie der abgeschiedenen SrTaO-Filme nicht verändert werden konnte. Aus diesem Grund wurde im Verbund entschieden, reine Sr- und Ta-Prekuroren zum Wachsen der SrTaO-Filme zu verwenden. Es wurde der Absolute-Sr Prekursor der Firma AirLiquide installiert und ein Prozessfenster für diesen Prekursor bei 400 °C entwickelt. Die abgeschiedenen SrO Filme sind amorph und die Abscheiderate beträgt 6 nm/min.

Die für Infineon auf TaN abgeschiedenen SrTaO Filme wurden in Abhängigkeit der Stresstemperatur charakterisiert. Die zunächst amorphen SrTaO Filme beginnen bei 800 °C zu kristallisieren. Zwischen der TaN Elektrode und dem Si Wafer kommt es zu einer Silizidbildung bei 900 °C. Obwohl SrTiO hohe k-Werte von ca. 150 aufweist, wird der Gebrauch dieses Materials in MIM Kondensatoren aufgrund der schlechten Leckstromcharakteristik eingeschränkt. Deshalb wurden dielektrische SrTiO/SrTaO Stapel in Kooperation mit dem Medea+-Partner ASMI abgeschieden und untersucht. Das SrTiO Dielektrikum wird mittels ALD abgeschieden und bei 550 °C thermisch behandelt, um die dielektrische Schicht in den kristallinen Zustand zu transferieren. Zudem wird eine SrTaO Schicht mittels AVD abgeschieden, die bei 550 °C amorph bleibt, um den Leckstrom zu reduzieren. MIM Kondensatoren mit folgendem Aufbau: Au/SrTiO/TaN, Au/SrTaO/SrTiO/TaN und Au/SrTiO/SrTaO/TaN wurden prozessiert und mittels elektrischer und analytischer Methoden charakterisiert. Der Einfluß der SrTaO-Schichtdickei wurde untersucht und bewertet. Die Ergebnisse demonstrieren, dass die Verwendung von dünnen SrTaO Schichten die Leckstromdichten von MIM Kondensatoren reduziert (s. Abb. 1). Die prozessierten dielektrischen Stapel weisen einen Weg auf, hohe Kapazitätsdichten und kleine Stromdichten gleichzeitig zu erreichen.

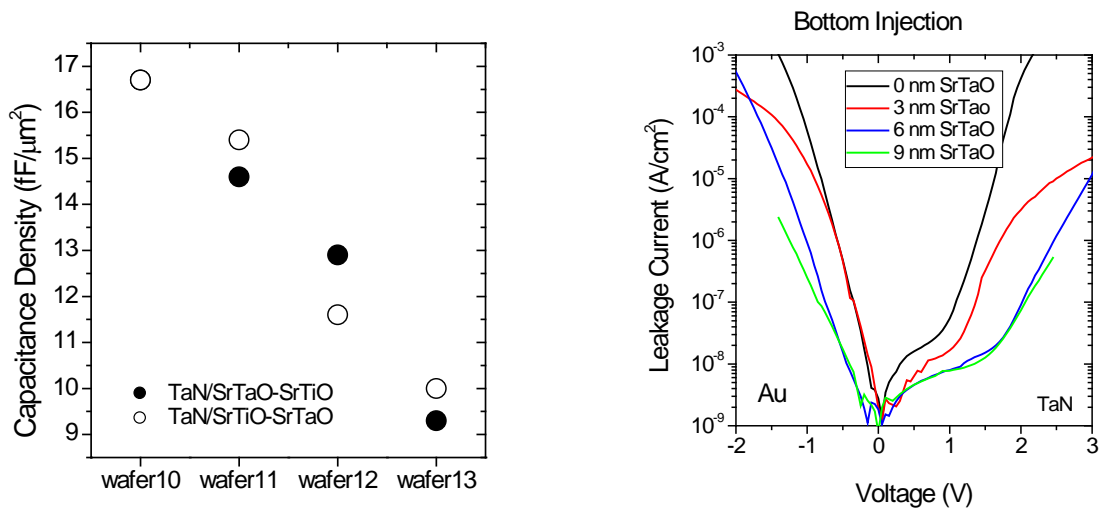


Abb. 1: CV und IV Charakteristika der SrTiO/SrTaO basierten MIM Strukturen

Die Abscheidungen der TiTaO_x Schichten unter Verwendung des von SAFC bereitgestellten Prekursors wurden begonnen. Die Zusammensetzung, Kristallinität und elektrische Eigenschaften wurden in Au/TiTaO/TiN MIM Kondensatoren untersucht. Der k-Wert der amorphen TiTaO_x-Schichten beträgt ca. 50 (s. Abb. 2)

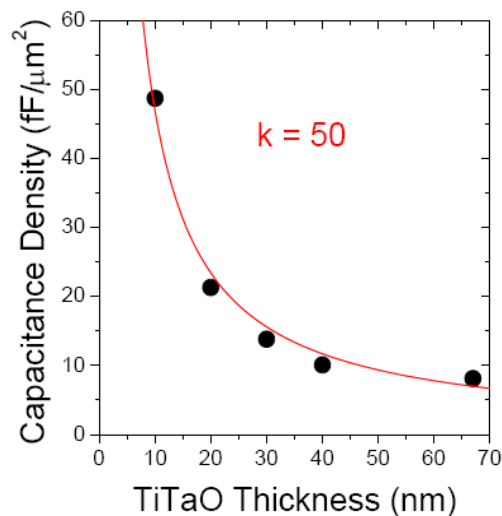


Abb. 2: Kapazitätsdichte der Au/TiTaO/TiN Kondensatoren in Abhängigkeit der TiTaO Schichtdicke.

Zur Prozessintegration und Herstellung der Testbauteile mit TiTaO als Dielektrikum in MIM Kondensatoren ist eine Studie des Einflusses der oberen Elektrode notwendig. Bisher wurde Gold, welches über eine Schattenmaske abgeschieden wurde, als obere Elektroden der IHP-Teststrukturen benutzt. Im IHP wurde ein Tantalnitrid basierter Sputterprozess nach Vorgaben von Infineon eingefahren, um dessen Einfluss auf die zu integrierenden MIM Kondensatoren zu evaluieren. Die Untersuchungen der TaN basierten MIM Strukturen wurden begonnen.

Das Material-Screening wurde Ende 2010 abgeschlossen. Folgende Prekursoren wurden am IHP und beim Unterauftragsnehmer Universität Vilnius eingefahren und getestet:

SrTa-Prekursor (SAFC)	IHP
Ta-Prekursor (SAFC, AirLiquide)	IHP
Ti-Prekursor (SAFC, AirLiquide)	IHP
Sr-Prekursor (AirLiquide)	IHP
Ce- und Al-Prekusoren	Uni Vilnius

Folgende UHK-Materialien wurden mittels der obigen Prekusoren abgeschieden und charakterisiert:

- Sr-Ta-O	bis 10/09
- Sr-Ta-O / Sr-Ti-O	bis 10/09
- Ti-Ta-O	optimiert → AP 05, 06
- Ce-Al-O	Universität Vilnius

Die Arbeiten zur Prozessentwicklung eines ausgewählten Dielektrikums auf einen Batch-ALD-Reaktor wurden Anfang 2009 begonnen. Zunächst wurde in Absprache mit den Projektpartnern das UHK-Dielektrikum TiTaO als zum jetzigen Zeitpunkt aussichtsreichster Kandidat benannt.

Positiv:

$$k = 50 \Rightarrow C_{2D} \approx 40 \text{ fF}/\mu\text{m}^2 \text{ mit } \alpha = 1000 \text{ ppm}/V^2$$

Negativ

$$E_{\text{gap}} = 3.1 \text{ eV} \Rightarrow \text{Leckstrom zu hoch}$$

⇒ TiTaO/Electrode Interface Engineering in AP06 war notwendig

Zur Prozessintegration und Herstellung der Testbauteile mit TiTaO als Dielektrikum in MIM Kondensatoren ist eine Studie des Einflusses der oberen Elektrode notwendig. Bisher wurde Gold, welches über eine Schattenmaske abgeschieden wurde, als obere Elektroden der IHP-Teststrukturen benutzt. Im IHP wurde ein Tantalnitrid basierter Sputterprozess nach Vorgaben von Infineon eingefahren, um dessen Einfluss auf die zu integrierenden MIM Kondensatoren zu evaluieren. Zudem wurden die folgenden CMOS kompatiblen Elektrodenmaterialien im IHP charakterisiert:

- TiN (PVD, AVD und ALD)
- W (CVD, 2 Prozesse)
- TaN (PVD und AVD)
- Ru (AVD)

Mittels Ultraviolett-Photoelektronenspektroskopie wurden die Austrittsarbeiten der Elektroden-Materialien im As-deposited Zustand, als auch nach einer simulierten Oxid-Abscheidung bei 400 °C. Die Ergebnisse sind:

	as deposited:	after annealing:
W_{bulk} :	4.3 eV	4.5 eV
W_{nuk} :	4.5 eV	4.8 eV
TaN:	4.3 eV	4.4 eV
Ru:	5.7 eV	5.5 eV
TiN:	4.2 eV	4.8 eV

Tabelle 1: Austrittsarbeiten der untersuchten Elektrodenmaterialien.

Zusammenfassung der Resultate:

- TiN, TaN: besitzen hohe Austrittsarbeiten (4.5 – 4.8 eV)
- Ru weist die größte Austrittsarbeit (5.5 eV) auf, ist allerdings zu rau

Zur Evaluierung der am besten geeigneten Elektrodenmaterialien für TiTaO wurde folgende Test-Matrix untersucht (siehe Abb 3.):

Bottom Elektrode: Dielektrikum: Top Elektrode
TiN; TaN TiTaO Au (Referenz); TaN, TiN, Ti

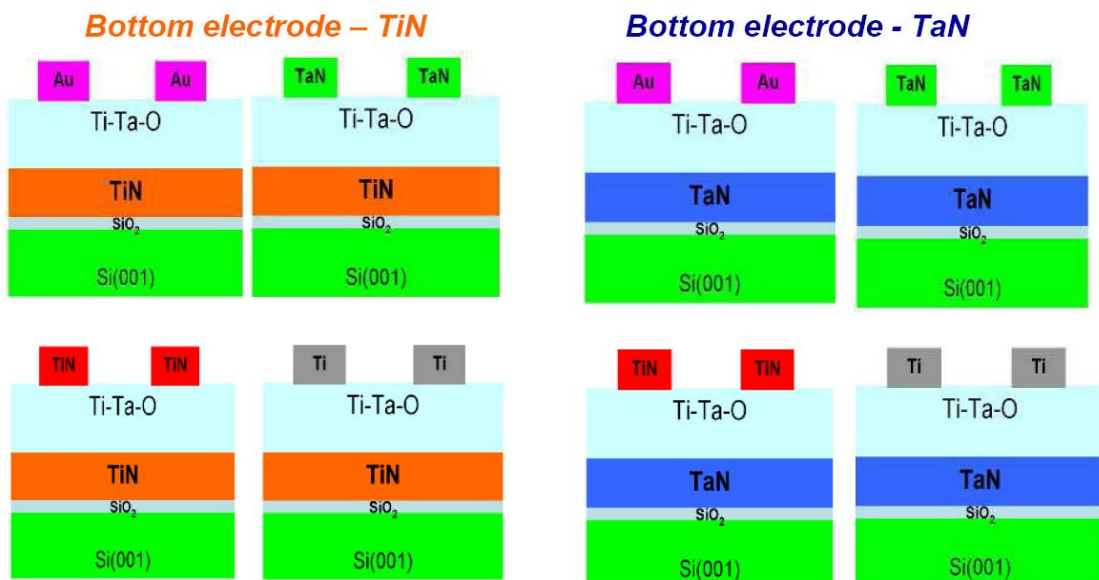


Abb. 3: Teststrukturen der TiTaO basierten MIM Kondensatoren

Die Kapazitäten und Stromdichten wurden als Funktion der Schichtdicke für jede Teststruktur bestimmt:

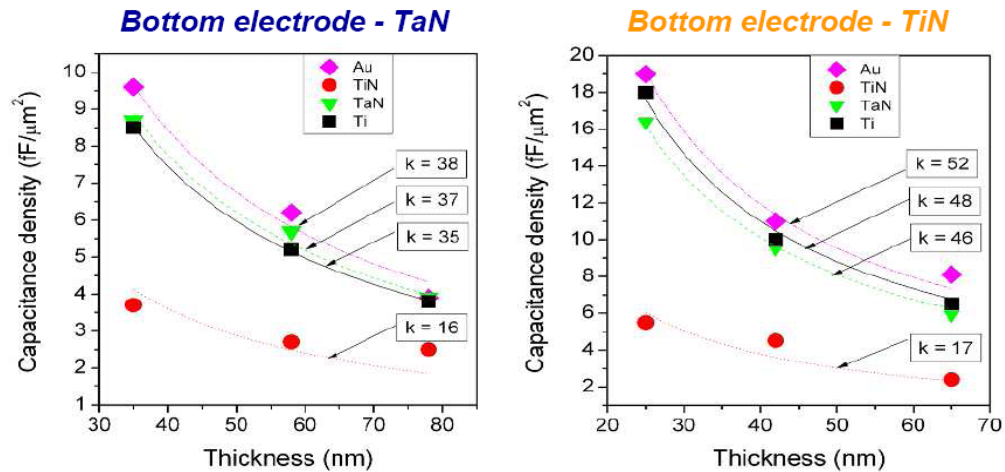


Abb. 4: Kapazitäten der MIM Kondensatoren als Funktion der TiTaO Schichtdicke.

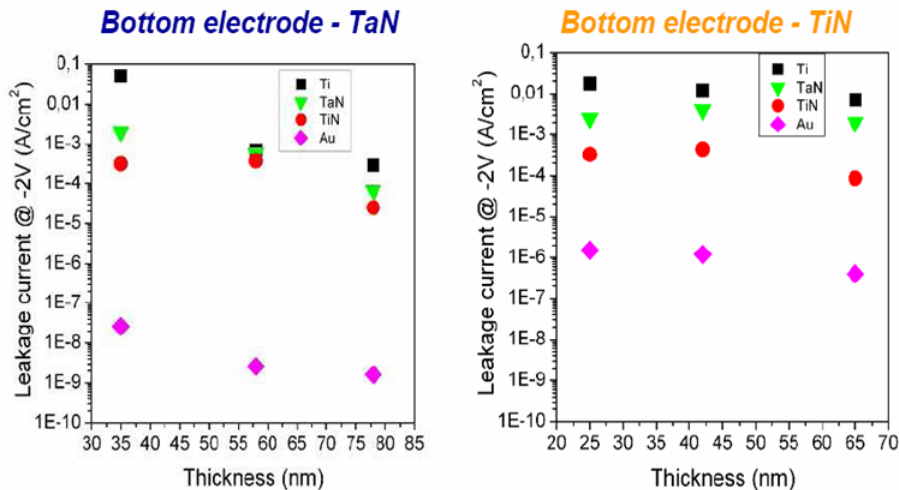


Abb. 5: Leckstromdichten der MIM Kondensatoren als Funktion der TiTaO Schichtdicke.

Zusammenfassung der Resultate zum Elektrodenmaterial:

- Die Leckströme konnten mittels TaN als Elektrodenmaterial reduziert werden.
- TiN als Top-Elektrodenmaterial reduzierten deutlich die dielektrische Konstante.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Abscheidungen von unterschiedlichen UHK Materialien mit Perowskit-ähnlichen Strukturen mittels AVD umfangreich untersucht wurden. Die detaillierten Ergebnisse wurden in 12 referierten Publikationen veröffentlicht. Als aussichtreichster Kandidat für die ALD Abscheidung beim Projektpartner Infineon wurde das Material TiTaO identifiziert. Zur Prozessintegration und Herstellung der Testbauteile mit TiTaO als Dielektrikum in MIM Kondensatoren wurde zudem der Einfluss der unterschiedlicher Elektrodenmaterialien ausführlich untersucht.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Pos. 0812 beinhaltet die Personalausgaben für drei Mitarbeiter für 3 Jahre

Pos. 0843 beinhaltet einen Zuschlag von 10 % auf die gesamten für das Vorhaben angesetzten Personalausgaben zur Deckung der mit dem Verwendungszweck zusammenhängenden Ausgaben für Infrastrukturleistungen. Des Weiteren wurden in drei Jahren der Projektlaufzeit Verbrauchsmaterial für Filamente, Prekusorenbehälter und deren Reinigung, Silizium-Wafer, Quarz-Adapter, Cs-Emitter und Maskensätze benötigt.

Pos. 0846 beinhaltet Dienstreisen zu Projekttreffen (auch zu Medea+ Treffen) und nationalen und internationalen Projekttreffen.

Pos. 0835 beinhaltet einen Fremdauftrag an die Universität Vilnius in Litauen. Im Rahmen des Auftrages wurden CeAlO₃ Schichten mittels AVD (MOCVD) optimiert. Die chemische Fakultät der Universität Vilnius besitzt unter der Leitung von Herrn Prof. Adulfis Abrutis eine MOCVD Anlage für die Grundlagenforschung, deren Aufbau vergleichbar zur IHP Anlage ist. Die in Vilnius ermittelten Abscheidebedingungen liessen sich unmittelbar auf die Produktionsanlage des IHP übertragen. Für einen schnellen Fortschritt des Projektes war es notwendig, diesen Auftrag an die Universität Vilnius zu vergeben.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt ist an der vordersten Front der mikroelektronischen Forschung angesiedelt und wird in Konkurrenz zu zahlreichen internationalen Mitbewerbern durchgeführt; denn es geht um die Erforschung neuer Materialien und geeigneter Schichtstapel, die die Grundlage für marktfähige Produkte bilden sollen. Diese Produkte werden z. B. in zukünftigen Automobilen dazu beitragen, die Zahl der Unfälle weiter zu verringern und die Unfallfolgen zu begrenzen. Da Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Mikro- und Nanoelektronik sehr schnelllebig sind, müssen wirtschaftlich verwertbare Ergebnisse zur richtigen Zeit vorliegen. Daraus resultieren sowohl hohe wirtschaftliche als auch wissenschaftlich-technische Risiken; denn die Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeit sind nur begrenzt planbar. Um diese Risiken zu verringern, muss das vorhandene Forschungspotential gebündelt und zugleich leistungsfähiger gemacht werden. Das ist mit den Mitteln der Grundfinanzierung allein nicht möglich. Daraus ergab sich unmittelbar die Notwendigkeit der finanziellen Zuwendung im Rahmen dieses Projektes.

Das IHP erhielt durch die gewonnenen Ergebnisse dieses Projektes eine deutliche Kompetenzerweiterung. Insbesondere werden die Erkenntnisse in die Charakterisierung der funktionalen Bauelemente in der 0.13 µm-BiCMOS-Pilotlinie des IHP einfließen. Metall-Isolator-Metall (MIM)-Kondensatoren sind wichtige passive Bauelemente in Radiofrequenz (RF)- und integrierten Schaltungen (IC) in der Systementwicklung des IHPs. Die Integration von MIM-Kondensatoren hoher Präzision in mikroelektronische Spitzentechnologien ist unverzichtbar für die Realisierung von Anwendungen integrierter Schaltungen für analoge und digitale Signale (sogenannte „Mixed-Signal-IC“-Anwendungen), wie Operationsverstärker mit geringer Offset-Spannung, Schaltkreise mit analoger Frequenzabstimmung, kapazitätsgeschaltete Schaltkreise, Filter, Schwingkreise sowie Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandler. In diesen Anwendungen haben MIM-Kondensatoren wegen ihrer hoch leitfähigen Elektroden und ihrer geringen parasitären

Kapazitäten große Bedeutung erlangt. Moderne MIM-Kondensatoren müssen eine hohe Kapazitätsdichte besitzen, um über ihren reduzierten Flächenbedarf die Schaltkreisdichte zu vergrößern und so die Produktionskosten weiter zu senken. Die Verwendung von Hoch-*k*-Dielektrika ist ein effizienter Weg, um die Kapazitätsdichte der MIM-Kondensatoren zu erhöhen.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

- Die am Projekt MaxCaps beteiligten Mitarbeiter waren:

Herr Mindaugas Lukosius

Herr Christian Walczyk

Frau Canan Baristiran-Kaynak

nutzten die erzielten Ergebnisse für ihre Dissertationen. Herr Mindaugas Lukosius schloss seine Promotion mit dem Titel „Atomic Vapor Deposition of Metal-Insulator-Metal-capacitors: Investigation, Development and Integration“ am 12.03.2010 im Alter von 28 Jahren an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg mit der Note „summa cum laude“ ab.

Frau Canan Baristiran-Kaynak befindet sich in der Endphase des Zusammenschreibens und wird ihre Dissertation in kürze an der Technischen Universität Berlin einreichen.

- In das Projekt MaxCaps war eine wissenschaftliche Hilfskraft integriert, deren Arbeit ihrer wissenschaftlichen Qualifizierung diene.

- Ausgewählte Ergebnisse des Projekts werden sukzessive in Lehrveranstaltungen des Fachgebiets Materialforschung in der jährlichen Sommerschule „Mikroelektronik“ in Frankfurt (Oder) einbezogen und verbessern somit die Qualität der studentischen Ausbildung.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger sind im Verlauf des Vorhabens keine Ergebnisse bekannt geworden, die das Ergebnis der Arbeit beeinflusst haben.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

- (1) M. Lukosius, C. Baristiran-Kaynak, A. Abrutis, M. Skapas, V. Kubilius, A. Zauner, G. Ruhl and Ch. Wenger, “Metal–insulator–metal capacitors with MOCVD grown Ce–Al–O as a dielectric”, *Microelectronic Engineering* 88 (2011) 1529.

- (2) M. Lukosius, C. Baristiran-Kaynak, S. Rushworth, Ch. Wenger, „HfO₂, Sr-Ta-O and Ti-Ta-O high-k dielectrics for metal-insulator-metal applications”, J. Electrochem. Soc. 158 (2011) G119.
- (3) M. Lukosius, C. Baristiran-Kaynak, Ch. Wenger, G. Ruhl, S. Rushworth, P. Baumann, „Atomic Vapor Depositions of Ti-Ta-O thin films for Metal-Insulator-Metal applications”, Thin Solid Films 519 (2011) 3831.
- (4) M. Lukosius, C. Baristiran Kaynak, Ch. Wenger, G. Ruhl, S. Rushworth, „Electrical characteristics of Ti-Ta-O based MIM capacitors“, J. Vac. Sci. Technol. B 29(1) (2011) 01AC01.
- (5) C. Baristiran-Kaynak, M. Lukosius, I. Costina, B. Tillack, Ch. Wenger, G. Ruhl, T. Blomberg, “Enhanced leakage current behavior of Sr₂Ta₂O_{7-x}/SrTiO₃ bilayer dielectrics for metal-insulator-metal capacitors”, Thin Solid Films 519 (2011) 5734.
- (6) M. Lukosius, C. Baristiran-Kaynak, Ch. Wenger, S. Rushworth, “Alternative high-k dielectrics for MIM applications” ECS Transactions 33 (2010) 15.
- (7) C. Baristiran Kaynak, M. Lukosius, I. Costina, B. Tillack, G. Ruhl, S. Rushworth “Investigations of thermal annealing effects on electrical and structural properties of SrTaO based MIM capacitor”, Microelectron. Eng. 87 (2010) 2561.
- (8) C. Baristiran Kaynak, M. Lukosius, B. Tillack, Ch. Wenger, T. Blomberg, G. Ruhl “Single SrTiO₃ and Al₂O₃/SrTiO₃/Al₂O₃ based MIM Capacitors: Impact of the Bottom Electrode Material” Microelectronic Engineering 88, 1521 (2011)
- (9) Ch. Wenger, M. Lukosius, H.-J. Müssig, G. Ruhl, S. Pasko, Ch. Lohe “The Influence of the Electrode Material on HfO₂ MIM Capacitors” Journal of Vacuum Science and Technology B 27, 286 (2009)
- (10) Ch. Wenger, M. Lukosius, T. Blomberg, A. Abrutis, P.K. Baumann, G. Ruhl “ALD and AVD Grown Perovskite-Type Dielectrics for Metal-Insulator-Metal Applications” ECS Transactions 41(2), 53 (2011)
- (11) M. Lukosius, C. Baristiran Kaynak, S. Kubotsch, T. Blomberg, G. Ruhl, Ch. Wenger “Properties of Atomic-Vapor and Atomic-Layer Deposited Sr, Ti, and Nb Doped Ta₂O₅ Metal-Insulator-Metal Capacitors” Thin Solid Films (accepted)
- (12) C. Baristiran Kaynak, M. Lukosius, B. Tillack, Ch. Wenger, A. Abrutis, M. Skapas “Ce_xAl_yO_z/TiN Stack Analysis for MIM Applications: Effect of Annealing and the Metal Electrode Deposition Method” Thin Solid Films (accepted)

IV. Berichtsblatt (Document Control Sheet)

1. ISBN oder ISSN: „geplant“	2. Berichtsart: Schlussbericht	
3. Titel: Materialien für extrem hohe integrierte Kapazitäten (MaxCaps) Teilprojekt: Präparation und Charakterisierung von MIM-Kondensatoren		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. habil. Christian Wenger	5. Abschlussdatum des Vorhabens: August 2011	
	6. Veröffentlichungsdatum „geplant“	
	7. Form der Publikation: Broschüre	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) IHP – Leibniz Institut für innovative Mikroelektronik Im Technologiepark 25 15236 Frankfurt Oder	9. Ber. Nr. Durchführende Institution . -	
	10. Förderkennzeichen: 13N9926	
	11. Seitenzahl: 20	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben: 2	
	14. Tabellen: 2	
	15. Abbildungen: 5	
16. Zusätzliche Angaben - keine -		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Ein häufig verwendetes Bauteil sind in der Automobilelektronik Kondensatoren, sei es als Block-Kondensatoren oder Analog-Kondensatoren. Diese Kondensatoren sind aufgrund der notwendigen Kapazitäten bisher als diskrete Bauteile, in der Regel SMD, ausgeführt, die auf der Systemplatine mit entsprechendem Flächenverbrauch montiert werden. Um die benötigte Fläche zu reduzieren, können mehrere dieser diskreten Kondensatoren in Chips mit hoher Integrationsdichte integriert werden. Dazu sind jedoch integrierte Kondensatoren mit sehr hohen spezifischen Flächenkapazitäten notwendig. Gesamtziel des Projekts war die Entwicklung hochleistungsfähiger und in Silizium integrierbarer Kondensatoren auf Basis neuer Materialien mit hohen Dielektrizitätskonstanten, die für zuverlässige Automobilelektronik eingesetzt werden können. Der Schwerpunkt lag dabei auf Perowskit-artigen Materialien, die eine hohe bis sehr hohe Dielektrizitätskonstante besitzen.		
19. Schlagwörter MIM Kondensatoren, High-k, Dielektrika		
20. Verlag -	21. Preis -	

1. ISBN or ISSN In progress	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title Materials for extremely high integrated capacitors (MaxCaps) Project part: Preparation and characterization of MIM capacitors		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. habil. Christian Wenger	5. end of project: August 2011	
	6. publication date In progress	
	7. form of publication paper	
8. performing organization(s) (name, address) IHP – Leibniz Institute for Innovative Microelectronics Im Technologiepark 25 15236 Frankfurt Oder	9. originator's report no. -	
	10. reference no. 13N9926	
	11. no. of pages: 20	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references: 2	
	14. no. of tables 2	
	15. no. of figures 5	
16. supplementary notes -		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract Commonly used components in the automotive electronics are capacitors, used as a blocking capacitors and analog capacitors. Due to the required capacity, these capacitors are used as discrete components so far, usually SMD technology, mounted on the system board with the appropriate use of area. In order to reduce the required area, several of these discrete capacitors are integrated with high integration density. However, integrated capacitors with very high specific surface capacity are necessary. The overall objective of the project was the development of high performance and integratable capacitors based on new materials with high dielectric constants, which can be used for reliable automotive electronics. The focus was on perovskite-type materials demonstrating very high dielectric constants.		
19. keywords MIM capacitor, high-k dielectrics		
20. publisher	21. price	

