Oxidische Dielektrika – dünne Isolatorschichten für Kondensatoren

Dr. sc. nat. H.-D. Langer
TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Physik/ Elektronische Bauelemente

Dünne Schichten der einfachen Ventilmetalloxide – z. B. Al_2O_3, Nb_2O_5, SiO_2 und Ta_2O_5 – haben in der diskreten und integrierten Kondensatortechnik z. T. bereits eine überragende technische Bedeutung erlangt, ohne daß ein Ende dieser Entwicklung abzusehen ist. Einen Anwendungsschwerpunkt bilden zunehmend binäre Komposite von einfachen Oxiden, wobei das Strukturspektrum von binären Mischoxiden als einem Grenzfall (atomar dispers verteilte zweite Kationenkomponente) über räumlich ungeordnete Oxidkomposite (Oxidgemische) bis zu extrem anisotropen Kompositstrukturen (übereinandergestapelte binäre Oxidlagen) als zweitem Grenzfall reicht. In dieser Gruppe sind auch Stapelungen oxidischer und nichtoxidischer Isolatorschichten (z. B. SiO_2/Si_3N_4) einzuordnen.

Tafel 1. Typische dielektrische Werkstoffe der Kondensatortechnik

Dielektrikum	Typischer Werkstoff	Typischer Vertreter
Metalloxid	amorphe Schicht	anodisches Ta_2O_5 thermisches SiO_2
	Schicht mit amorphen und kristallinen Anteilen	anodisches Al_2O_3
	Quarz	α-SiO_2
Keramik	Titanat	$BaTiO_3$
amorphes Glas	Silikatglas	$SiO_2-B_2O_3-Na_2O$
kristallines Glas	Keimbildner/Glas	$TiO_2/2\,MgO-2\,Al_2O_3-5\,SiO_2$
Glaskeramik	Titanat/Glas	$BaTiO_3-BaAl_2Si_2O_8$
Glasemaille	Dickschichtpaste	$TiO_2/PbO-B_2O_3-SiO_2$
Porzellan	Kaolin/Quarz/Feldspat	
Glimmer	Mineralglimmer	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
Komposit:		
Oxid–Oxid	Oxidgemisch	$BaSrTiO_3$
Oxid–Metall	Eutektikum	$MgO-W$
anorganische nichtoxidische Verbindung:	Fluoridschicht	MgF_2
Kunststoff	Polymerisat	Polykarbonat: $(C_{16}H_{14}O_3)_n$
Lack	Polymerisatlack	Polystyrol-Lack: $(C_8H_8)_n$
Luft	Preßgas	$O_2/N_2 + CCl_4$
Vakuum	(10^{-2} ... 10^{-4} Pa)	

Tafel 2. Herstellung und elektrische Eigenschaften von Schichten einfacher, anorganischer nichtoxidischer Dielektrika

Anorganische Verbindung	Herstellungsverfahren	Eigenschaften
Si_3N_4	Pyrolyse	$\varepsilon = 6{,}2$; $E_D = 1 \cdot 10^7\ V \cdot cm^{-1}$; $\varrho \geqq 10^{15}\ \Omega \cdot cm$
BN	reaktives Ionenplattieren	$\varrho = 10^{10}$ ... $10^{14}\ \Omega \cdot cm$
MgF_2	Aufdampfen	$\varepsilon = 5$ ... $6{,}5$; $\tan\delta = 0{,}1$ ... 10%; $E_D \geqq 2 \cdot 10^3\ V \cdot cm^{-1}$
CeF_4	Aufdampfen	amorph: $\varepsilon = 8{,}2$ ... 14; $\tan\delta = 0{,}7$ ... 3%; $E_D = 1 \cdot 10^6\ V \cdot cm^{-1}$; $\varrho = 10^{12}$ ... $10^{13}\ \Omega \cdot cm$ kristallin: $\varepsilon = 52$ ... 280
LiF	Aufdampfen	$\varepsilon = 5{,}2$; $\tan\delta = 0{,}1$ ... 3%
Na_3AlF_6	Aufdampfen	$\tan\delta = 7{,}5$ ... 10%; $E_D = 0{,}3 \cdot 10^6$ ... $1{,}6 \cdot 10^6\ V \cdot cm^{-1}$
NaCl	Aufdampfen	$\tan\delta \geqq 4\%$; $E_D = 0{,}5 \cdot 10^6$ ... $1 \cdot 10^6\ V \cdot cm^{-1}$
NaBr	Aufdampfen	$\tan\delta \geqq 10\%$
ZnS	Aufdampfen	$\varepsilon = 8{,}2$ ... 10; $E_D \geqq 2 \cdot 10^2\ V \cdot cm^{-1}$; $\tan\delta = 0{,}8$ ... 1%

Eine dritte Innovationsrichtung leitet sich aus dem Erfordernis ab, bestimmte oxidische Werkstoffsysteme in Schichtform darzustellen, die aus mehr als zwei Komponenten zusammengesetzt sind. Dazu gehören Gläser wie beispielsweise das System SiO_2-B_2O_3-Dy_2O_3, aber auch Glas-Keramiken und andere oxidische Phasen, die sich in kompakter Form in der Kondensatortechnik bewährt haben (Tafel 1). Unter diesem Gesichtspunkt besonders interessant sind ferroelektrische Keramiken mit Dotanden bzw. Zusätzen, die in Form von integrierten Multidünnschichtstrukturen den keramischen Stapelkondensator in Chip-Bauweise substituieren könnten. Im vorliegenden Beitrag wird auf einige werkstofftechnologische Aspekte und Eigenschaften der einfachen Oxide in Dünnschichtform eingegangen, die auch teilweise auf komplexere oxidische Dünnschichten übertragbar sind.

1. Anwendung/Stabilität

Die starke Bindung des Sauerstoffs mit einem oder mehreren Partnern aus der Gruppe der Metalle, Halbmetalle und Elementhalbleiter hat nach Tafel 1 in dielektrischen Werkstoffen der Kondensatortechnik große Verbreitung gefunden. Trägt man die Bindungsenthalpie ΔH^0_{298} je g-Atom des Sauerstoffs für die einfachen Oxide über der Ordnungszahl Z des Kations auf (Bild 1), so fällt auf, daß außer charakteristischen Abhängigkeiten, die auf periodische Z-Korrelationen der Kationen-Elektronenstruktur zurückzuführen sind, für alle gegenwärtig als Isolatordielektrikum bedeutsamen Verbindungen $\Delta H^0_{298} \gtrapprox 2{,}80$ eV/g-Atom gilt. Der engere Kreis der in der Oxidkondensatortechnik wichtigen Elemente, zu denen vor allem die Ventilmetalle und Silizium zu zählen sind, liegt sogar bei $\Delta H^0_{298} \gtrapprox 3{,}90$ eV/g-Atom. Die meisten signifikanten Kationen haben abgeschlossene Elektronenschalen, die ihre stabile Bindung zum Sauerstoff erklären. Die betreffenden Oxide bilden für sich bzw. als Dotand, Zusatz oder Mischungspartner in einem anderen Oxid ein potentielles Reservoir für die Anwendung bzw. Erkundungsforschung im Kondensatorbereich. Bevor auf deren Herstellungsverfahren und Eigenschaften eingegangen wird, soll an Hand von Tafel 2 auf andere einfache anorganische Verbindungen hingewiesen werden, die neben anderen ebenfalls als Isolatordielektrikum untersucht wurden. Eine weitere Gruppe, über die aber bisher weniger bekannt ist, bilden die Arsenide, Antimonide, Selenide, Telluride, Silizide und Phosphide.

2. Herstellung

Obgleich es unter dem Gesichtspunkt der fortgeschrittenen Reinheitskriterien und Beherrschbarkeit der Halbleitertechnologie nicht mehr in voller Schärfe zutreffend ist, gelten Korngrenzen bzw. an diesen angehäufte Verunreinigungen als Ursache für eine verringerte Spannungsfestigkeit polykristalliner Isolatordielektrika, während einkristalline Schichten der entsprechenden Verbindungen nur unter schwierigen Bedingungen herstellbar sind.

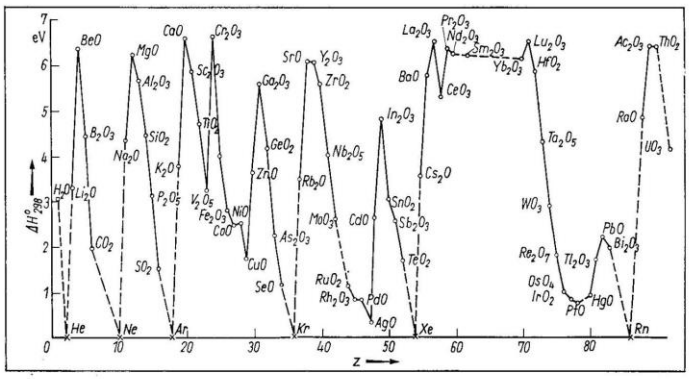


Bild 1. Bindungsenthalpie der einfachen Oxide in Abhängigkeit von der Ordnungszahl

Tafel 3. Vorteile und Nachteile von Verfahren zur Herstellung oxidischer und anderer anorganischer, isolierender dielektrischer Schichten

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Verdampfen Blitzverdampfen	hohe Wachstumsrate, einfache Technologie	Stöchiometrieprobleme geringe Haftfestigkeit
.ktives Verdampfen	mittlere Wachstumsrate, Stöchiometrieverbesserung	komplizierte Technologie
Detonationsbeschichten	hohe Wachstumsrate, hohe Haftfestigkeit	umständliche Technologie
Gleich-, Wechselstrom- und Radiofrequenz-zerstäubung reaktive Zerstäubung Ionenstrahlzerstäubung	mittlere Wachstumsrate, homogene Schichtdicken-verteilung, breiter Anwendungsbereich	Stöchiometrieprobleme (Wärmebehandlung notwendig), Einbau von Verunreinigungen
Hochratezerstäubung (Magnetron/Plasmatron)	hohe Wachstumsrate	
reaktives Ionenplattieren	hohe Haftfestigkeit	
Ionenimplantation	Herstellbarkeit dotierter Dielektrika	Probleme der Alterungs-stabilität
Pyrolyse anorganischer Metallverbindungen, (CVD)	mittlere Wachstumsrate, reproduzierbare Struktur und Stöchiometrie	hohe Arbeitstemperatur, komplizierte Technologie
Pyrolyse organischer Metallverbindungen (CVD)	(einkristalline Schichten möglich)	komplizierte Technologie, Umweltverschmutzung
Aerosolsprühen Flammensprühen Lichtbogensprühen	einfache Technologie	geringe Haftfestigkeit, Schichtinhomogenitäten, große Schichtdicke je Zyklus
trophorese, Elektrokoagulation	hohe Wachstumsrate	Schichtporosität, starke Schichtverunreinigung
Auskristallisation aus homogenen Metallsalz/ Metalloxid-Schmelzen	hohe Wachstumsrate, gute Strukturreproduzierbarkeit (einkristalline Schichten möglich)	hohe Arbeitstemperatur, Einbau von Verunreinigungen des Lösungsmittels, begrenzte Anwendbarkeit
eutektische Erstarrung	in-situ-Herstellbarkeit von Metall-Oxid-Stapelfolgen	hohe Arbeitstemperatur, begrenzte Anwendbarkeit
thermische Oxydation	einfache Technologie, reproduzierbare Struktur	hohe Arbeitstemperatur
Plasmaoxydation (gasförmiger Elektrolyt)	hohe Reinheit, lochfreie Schichten	geringe Wachstumsrate
Selbstanodisation (flüssiger Elektrolyt, ohne äußere Spannungsquelle)	einfache Technologie	begrenzte Schichtdicke ($\leqq 10\ \mu m$)
anodische Oxydation (flüssiger Elektrolyt, mit äußerer Spannungs-quelle)	einfache Technologie, einfache Schichtdicken-kontrolle, homogene Schicht-dickenverteilung	polare Strom-Spannungs-Charakteristik
anodische Oxydation (fester Elektrolyt)	Ausheilbarkeit von Defekten (Selbstheileffekt)	Stöchiometrieprobleme
anodische Oxydation in der Funkenentladung (flüssiger Elektrolyt)	Ausheilbarkeit von Defekten	Einbau von Elektrolyt-verunreinigungen

Andererseits halten amorphe Dielektrika Feldstärken von 10^6 bis $10^7\ V \cdot cm^{-1}$ stand. Deshalb war der technische Fortschritt bei Oxidkondensatoren bisher stets mit technologischen Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Herstellung amorpher Isolatorschichten verbunden. Davon ausgehend, unter Berücksichtigung einer umfassenden Literaturrecherche sowie eigener experimenteller Erfahrungen, gelangt der Autor zu der in Tafel 3 vorgenommenen Einschätzung der Eignung unterschiedlicher Herstellungsverfahren für Isolatordünnschichten, die als Kondensatordielektrikum interessant erscheinen. Selbstverständlich ist diese pauschale Bewertung nur bedingt im konkreten Fall zutreffend, weil oft geringe technologische Variationen wesentliche Änderungen der Schichtstruktur zur Folge haben. Die größte Verbreitung als Schichtherstellungsverfahren hat die anodische Oxydation mit flüssigem Elektrolyt gefunden, da anodische Oxide fast in allen praktisch relevanten Fällen eine amorphe Struktur aufweisen. Der Begriff „amorph" ist nicht gleichbedeutend mit „strukturlos" im Sinne der Atomkernanordnung. Die Zerstörung der Fernordnung beim Übergang von der kristallinen zur amorphen Phase bedeutet kaum eine Änderung der Koordinationszahl und nur geringfügige Änderungen der Atomabstände und Valenzwinkel. Es existieren stabile Bindungspolyeder (z. B. Si-O-Tetraeder im SiO_2), deren leichte gegenseitige Verkippung oft noch eine mehr oder weniger definierte und ausgedehnte Nahordnung erkennen lassen. Die technologische Reproduzierbarkeit solcher Strukturen bereitet auch heute noch Schwierigkeiten, weil die Strukturnachweisverfahren aufwendig und damit für die direkte Prozeßsteuerung ungeeignet sind. Mehr noch trifft dies für die gezielte Manipulation der Stöchiometrie zu. Nahordnung, Stöchiometrie, Dotanden, Grenzflächen und geometrische Abmessungen der Schichten, Kristallite bzw. mikrostrukturellen Bereiche bestimmen die Zustände im Energiespektrum. Die Theorie leitet daraus eine Unschärfe der Bandränder zugunsten lokalisierter Zustände bzw. Zusatzbänder ab, die auch innerhalb der verbotenen Zone liegen, wenn man auf die Energiebandstruktur des entsprechenden kristallinen Festkörpers Bezug nimmt. Die Wahrscheinlichkeit für den Ladungsträgerübergang zwischen lokalisierten Zuständen (Hoppingprozesse) ist geringer als zwischen nichtlokalisierten, und es treten sehr niedrige Beweglichkeiten (10^{-2} bis $10^{-7}\ cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-2}$) bzw. sogar Beweglichkeitslücken auf. Der daraus resultierende Eigenschaftskomplex hat erstrangige Bedeutung in bezug auf die Schichtbildung und das elektrische und dielektrische Verhalten der Oxidschicht. Praktische Beispiele, wonach eine Stabilisierung der Nahordnung und Stöchiometrie erfolgt, sind u. a. die Wärmebehandlung, das Dotieren mit Netzwerkbildnern, die Vordotierung der Elektroden und die „Ausformierung" während der anodischen Oxydation. Die Eigenschafts-

manipulation im Sinne der gezielten Parameterbeeinflussung von Oxidkondensatoren konzentriert sich gegenwärtig darauf (direkte Elektronenstrukturbeeinflussung) und auf den Aufbau von Heteroübergängen (Kompositkonzept) innerhalb des Oxiddielektrikums bzw. an dessen Phasengrenzen durch Dotieren und Legieren von Zusätzen sowie durch Stufungen und Variationen von Technologieparametern während der Schichtherstellung. Das Dielektrikum soll an den Elektroden atomaren Kontakt haben, gut haften und frei von Mikrorissen und anderen Defekten sein. Diese Bedingungen lassen sich unter Beachtung der inneren Spannungen infolge der Realstruktur, der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der Volumenverhältnisse Metall/Oxid der Oxidelektroden sowie artefaktiven bzw. technologisch bedingten Inhomogenitäten (z. B. Schichtdicke, Porosität, Fremdpartikel, Adsorbate) nur bei ausreichend plastischen Eigenschaften des Oxiddielektrikums erfüllen. Sie werden praktisch eigentlich nur unter Nutzung des Selbstheileffekts bzw. durch ausreichend kleine Flächenabmessungen beherrscht. Zusammenfassend ist festzustellen, daß man die Vorteile und Nachteile der Herstellungsverfahren für Oxiddielektrika entsprechend den Angaben in Tafel 3 vor allem unter folgenden Gesichtspunkten zu bewerten hat:

- Anwendbarkeit der Technologie (u. a. auch Umweltfreundlichkeit) und des Verfahrens
- Reproduzierbarkeit (u. a. Mikrostruktur, Stöchiometrie, Reinheit, Porenfreiheit, homogene Schichtdickenverteilung, Maximaldicke, unpolare Kennlinie)
- Alterungsstabilität der Schicht und angrenzender Phasenbereiche (u. a. Selbstheileffekt, Dotierbarkeit)
- In-situ-Herstellbarkeit von Kondensatorstrukturen (u. a. eutektische Kondensatoren, Sperrschichtkondensatoren).

Die Schichtstabilität ist weder allein durch das Herstellungsverfahren noch durch die Dissoziationsenergie der oxidischen Verbindung (Bild 1) bestimmt. Es wirken zahlreiche Faktoren, die hier unter Hinweis auf einschlägige Literatur nur unter anderen genannt sein können:

- Metallelektroden
- flüssige und feste Elektrolytelektroden
- Substrat
- Umhüllung
- Betriebsbedingungen.

3. Eigenschaften

Von herausragender Bedeutung für die Kondensatoranwendung sind die Isolations- (elektrische Leitfähigkeit $\varkappa$, Feldstärkebelastbarkeit E_D) und die Polarisationseigenschaften (Dielektrizitätskonstante ε, dielektrische Verluste $\tan\delta$) in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen Temperatur und Druck sowie äußerer Einflußgrößen wie Polarität, Frequenz, Betrag der anliegenden Spannung und relative Luftfeuchtigkeit. In die Bewertung gehen ferner, wie bereits begründet, die technologischen Parameter ein. Einen quantitativen Vergleich der Stromdichte-Feldstärke-Kennlinien von anodischen Tantaloxidschichten ohne und mit Vakuumwärmebehandlung sowie Schichten, die durch Zerstäubung hergestellt worden sind, zeigt Bild 2.

Neben Feinheiten wird die technologische Abhängigkeit deutlich. (Der Einfluß der Schichtdicke ist in erster Näherung eliminiert durch Einführung der Feldstärke an Stelle der Spannung.) Die höchste Zustandsdichte bzw. Beweglichkeit zeigen aufgestäubte, die niedrigste anodisch oxydierte Schichten (flüssiger Elektrolyt). Eine Vakuumwärmebehandlung erhöht die Defektdichte der am Tantal anhaftenden anodischen Oxidschicht. Die Durchschlagsfeldstärke E_D amorpher defektfreier Dielektrika steht in enger Beziehung zu den Abmessungen der Nahordnungsbereiche und zur Schichtdicke. Es gilt im relevanten Schichtdickenbereich $0\,\mu\text{m} \leqq d \leqq 1\,\mu\text{m}$ etwa die im Bild 3a qualitativ gezeigte Korrelation, die experimentell bei sorgfältiger Trennung von Defekteinflüssen auch belegt ist. Die Ergebnisse werden durch Stöchiometrie und Bindungsverhältnisse, insbesondere die Anteile kovalent/ionisch beeinflußt (Bild 4). Wichtig für das klassisch-anschauliche Verständnis dieser Phänomene ist die Tatsache, daß die mittlere freie Weglänge mit $\lessapprox 0{,}1$ nm in der Größenordnung der Atomabstände liegt.

Die Feldtheorie liefert für die Polarisation P von Ionenkristallen im Frequenzbereich technischer Kondensatoren $0\ \text{Hz} \leqq f \leqq 1\ \text{GHz}$ den Ansatz

$$P = n\alpha E' \qquad (1)$$

n Dipoldichte
α Polarisierbarkeit.

Die am Ort der Dipole wirkende Feldstärke E' ist gleich der mittleren Feldstärke $E = U/d$, wenn n so gering ist, daß sich die Dipole

Bild 2. Vergleich der i-$\sqrt{E}$-Kennlinie anodischer (*1*), anodischer vakuumwärmebehandelter (*2*) und aufgestäubter Tantaloxidschichten (*3*) (i Stromdichte, E Feldstärke)

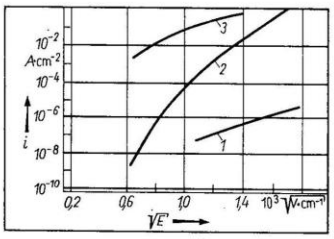


Bild 3. Qualitative Abhängigkeit
a) der Durchschlagsfeldstärke von der Schichtdicke der Oxidschichten
b) der elektrischen Leitfähigkeit und des dielektrischen Verlustfaktors amorpher dielektrischer Schichten (T = 20 °C) von der Frequenz

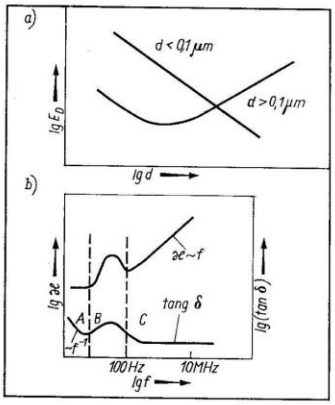


Bild 4. Verlustfaktor, Dielektrizitätskonstante und Durchschlagsfeldstärke unterschiedlicher Siliziumoxidphasen

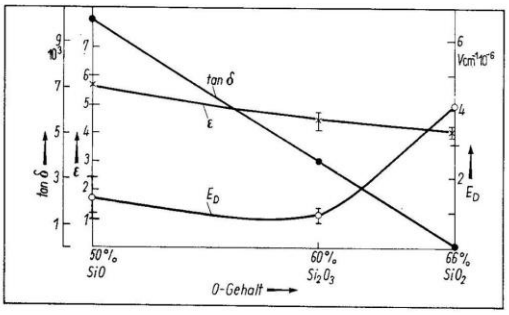
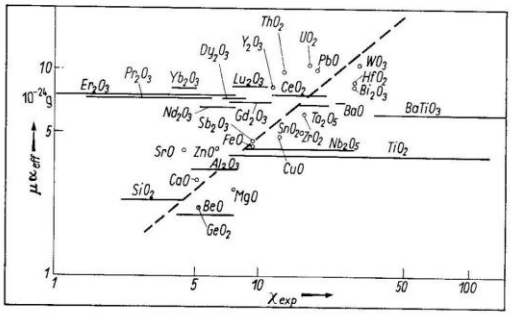


Bild 5. Einteilung der oxidischen Dielektrika an Hand einer Darstellung von $\mu\alpha_{eff}$ über χ_{exp}



gegenseitig nicht beeinflussen. Die relative Dielektrizitätskonstante ist definiert durch

$$P \equiv \varepsilon_0(\varepsilon - 1)\, E \tag{2}$$

ε_0 Influenzkonstante.

Aus den Gln. (1) und (2) folgt mit $E' = E$

$$\chi \equiv \varepsilon - 1 = \frac{n\alpha}{\varepsilon_0} \tag{3}$$

χ Suszeptibilität.

In Anlehnung an die Berechnung der Polarisierbarkeit α_H des Wasserstoffatoms, wonach $\alpha_H = 4\pi\varepsilon_0 r_H^3$ (r_H Atomradius von Wasserstoff), sei eine effektive Polarisierbarkeit α_{eff} des Oxides wie folgt definiert:

$$\alpha_{eff} = 4\pi\varepsilon_0 \frac{n_0 r_0^3 + \sum_{i=1}^{k} n_i r_i^3}{n_0 + \sum_{i=1}^{k} n_i} \tag{4}$$

n_0 Anzahl der Sauerstoffionen
n_i bzw. r_i Anzahl bzw. Radius der Kationensorte i.

Summiert wird über alle Kationensorten $i = 1 \ldots k$, die im oxidischen Dielektrikum enthalten sind. Die Dipoldichte ist der spezifischen Dichte μ proportional. Daraus folgt für eine effektive Suszeptibilität der Ansatz

$$\chi_{eff} \approx \mu\alpha_{eff}. \tag{5}$$

Trägt man gemäß Bild 5 $\mu\alpha_{eff}$ über $\chi = \varepsilon - 1$ doppeltlogarithmisch auf, so stellt man ungeachtet der Streubreiten fest, daß Gl. (5) für die verbreitetsten Dünnschichtoxid-Dielektrika in guter Näherung zutrifft. Die experimentellen Dielektrizitätskonstanten (Dünnschichtdielektrika) und die spezifischen Dichten (kompaktes Material) wurden der Literatur entnommen, wobei sich die ε-Streuung durch technologische Variationen erklärt. Die n_0 und n_i entsprechen den angegebenen chemischen Bruttoformeln. Es weichen aus bekannten Gründen die Ferroelektrika und infolge nicht in den Gln. (4) und (5) berücksichtigter Abschirmeffekte (f-Elektronen) die Oxide der Seltenerdmetalle erheblich ab. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß Gl. (5) nur ein praktikabler Ausdruck der Bornschen Formel in der 1. Näherung ist. Aus dem Diagramm im Bild 3b geht als experimentelle Erfahrungstatsache bei amorphen Dielektrika das qualitative Frequenzverhalten von $\varkappa$ und tan δ hervor. Man unterscheidet den Gleichstrombereich A, einen 1. Relaxationsbereich B mit Peaks in $\varkappa(f)$ und tan $\delta(f)$ sowie einen 2. Relaxationsbereich C mit $\varkappa \sim f$ und tan $\delta \approx$ konst. Der f-Bereich C wird technisch am meisten genutzt. Der Realteil ε' der komplexen Dielektrizitätskonstante ist in den Bereichen A bis C annähernd konstant, d. h., ε' ist etwa gleich der statischen Dielektrizitätskonstante. (Alle hier zitierten experimentellen Daten wurden, sofern nicht gesondert genannt, mit Kleinsignalwechselspannungen bei $f = 50$ bis 1000 Hz und $T = 20$ bis 40 °C gemessen.) Ein experimenteller Beleg des $\varkappa$- und tan δ-Verhaltens im Bereich C sind die Diagramme im Bild 6. Die Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes ϱ ($= \varkappa^{-1}$) in Tafel 2 beziehen sich auf Messungen an dünnen Schichten mit $f = 0$ Hz. Die entsprechenden kompakten Materialien (auch bei Oxiden) haben z. T. wesentlich größere ϱ [30]. Man hat bei der Bewertung dieser Phänomene außer den diskutierten Effekten der Elektronenstruktur die erhöhte Ionenbeweglichkeit in der Schicht zu beachten. Für anodische Oxidschichten liegt die kritische Feldstärke E_K, oberhalb des Wertes, wo der Ionenstrom dominiert, d. h. bei etwa 10^5 bis 10^7 V · cm^{-1}. Eine Gegenüberstellung der experimentellen Wachstumskonstanten β für $T \approx 20$ °C bei anodischer Oxydation mit flüssigem Elektrolyt mit den experimentell bestimmten Durchschlagsfeldstärken ergab, daß für Abschätzungen gilt:

$$E_K \lessapprox E_D \approx \beta^{-1}.$$

In der Literatur wird der folgende Ausdruck für den Temperaturkoeffizienten γ_C der Oxidkapazität angegeben:

$$\gamma_C = \frac{(\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2)}{\varepsilon}\left[\frac{1}{3\alpha}\left(\frac{\partial\alpha}{\partial T}\right)_p - \alpha_T\right] + 0{,}05 \tan\delta + \alpha_T \tag{6}$$

α_T linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient des Oxids.

Die näherungsweise für $\varepsilon \geqq 8$ und tan $\delta > 0{,}001$ aus Gl. (6) folgende lineare Korrelation zwischen γ_C und ε ist an Hand experimenteller Daten belegt. Bei niedrigen Feldstärken bestimmen oft die mikroskopischen Defekte den Isolationswiderstand. Sie sind es auch, die polare Sperrstromcharakteristiken erklären können, doch wuchsen das Verständnis und die Möglichkeiten der Zurückführung des polaren bzw. unpolaren Verhaltens von MIM-, MIS-, MIE- und MISE-Kondensatorstrukturen (*M* Metall, *I* Isolator, *S* Halbleiter, *E* Elektrolyt) auf die Elektronenstruktur des Heterosystems in dem Maße, wie es gelang, Defekte technologisch zu eliminieren. Hierzu sei auf die umfangreiche Originalliteratur verwiesen.

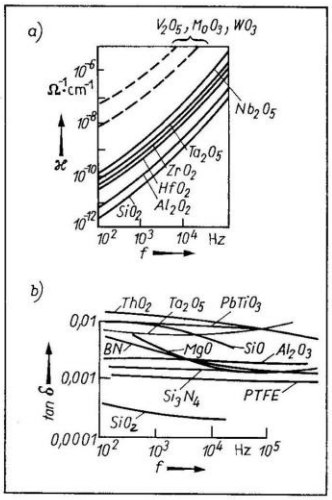


Bild 6. Spezifische elektrische Leitfähigkeit (*a*) und dielektrischer Verlustfaktor (*b*) in Abhängigkeit von der Frequenz bei einigen amorphen Schichtdielektrika

Dem Beitrag liegt ein sehr umfangreiches Literaturverzeichnis zugrunde.