

Herstellung und Charakterisierung von elektro-optischen $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ -Fasern zur optischen Messung von Hochspannungen

S. Wildermuth^a, K. Bohnert^a, H.Brändle^a, J.-M. Fourmigue^b und D. Perrodin^b

^aABB Schweiz AG, Corporate Research, Segelhof 1K, CH-5405 Baden Dättwil, Schweiz

^bFibercryst, S.A.S., La Doua – Bat L'Atrium, Bvd. Latarjet, F-69616 Villeurbanne Cedex, France

Email: stephan.wildermuth@ch.abb.com, Tel: +41 58 586 80 76, Fax: +41 58 586 60 04

Kurzbeschreibung

Optische Spannungswandler nutzen zumeist den Pockelseffekt in kristallinen Materialien wie z.B. $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) zur Spannungsmessung aus. In einer gebräuchlichen Klasse von Sensoren wird die volle Nennspannung von bis zu einigen 100 kV an einen relativ kurzen Sensorkristall mit einer Länge von typischerweise 100-200 mm angelegt. Die Länge des Kristalls ist hierbei durch die zur Verfügung stehenden Methoden zur Kristallzucht, wie z. B. Czochralski, beschränkt. In dieser Arbeit beschreiben wir die Herstellung von dünnen, einkristallinen BGO Stäben und Fasern mit einer Länge bis zu 850 mm mittels des so genannten „Micro-pulling down“ Verfahrens. Die optische Qualität dieser Kristalle und ihre Tauglichkeit zur Spannungsmessung wurden untersucht.

Einführung

Zur Strommessung und insbesondere zur Messung von Hochspannungen bei der Elektrizitätsübertragung und -verteilung werden herkömmlicherweise induktive oder kapazitive Messwandler verwendet. Diese Messwandler haben sich seit Jahrzehnten bewährt, haben aber auch deutliche Nachteile, wie zum Beispiel ein hohes Gewicht (bis zu einigen Tonnen bei sehr hohen Nennspannungen) infolge ihrer aufwändigen Isolation, einen relativ hohen Platzbedarf, eine begrenzte Bandbreite oder analoge Ausgangssignale (sekundäre Ströme oder Spannungen), die nicht unmittelbar mit modernen digitalen Geräten zur Kontrolle und Steuerung von Unterstationen kompatibel sind. Daher finden in letzter Zeit optische Strom- und Spannungssensoren als Alternative zu den konventionellen Verfahren zunehmendes Interesse. Die Vorteile der optischen Sensoren sind eine treuere Wiedergabe der primären Ströme und Spannungen (es gibt z. B. keine magnetische Sättigung), deutlich verringerte Abmessungen und Gewichte, bessere Umweltverträglichkeit und Betriebssicherheit (keine Ölisolierung), sowie eine digitale Ausgabe der Messwerte.

Die meisten optischen Spannungssensoren basieren auf dem Pockels Effekt in elektro-optischen Kristallen, wie z.B. $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) [1,2]. Die maximale Länge dieser Kristalle ist auf Grund der konventionellen Herstellungsverfahren (Czochralski) auf 100-200 mm begrenzt. Da typischerweise die volle Nennspannung über diesem Kristall abfällt (Abbildung 1), kann mit einer langen kristallinen Faser die mittlere elektrische Feldstärke reduziert und auf diese Weise die Anforderungen an die dielektrische Isolation des Sensors gesenkt werden.

Optische Hochspannungsmessung

Die Spannung V_{AB} zwischen zwei Punkten A und B definiert sich als Differenz der elektrischen Potentiale an diesen Punkten. Die Potentialdifferenz lässt sich als Linienintegral des elektrischen Feldes entlang eines beliebigen Weges von A nach B ausdrücken:

$$V_{AB} = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$



Abb 1: Elektro-optischer Spannungssensor zur Installation in einer gasisolierten Schaltanlage mit einer Nennspannung von 170 kV [3].

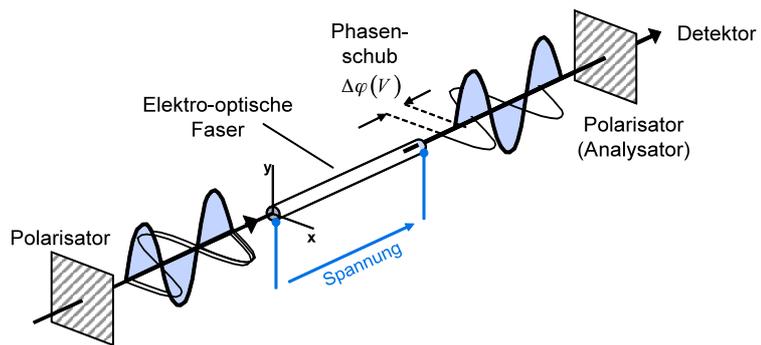


Abb 2: Aufbau zur Messung des Pockels-Effekts. Zwei orthogonale linear polarisierte Lichtwellen durchlaufen eine BGO Faser in longitudinaler Richtung. Der durch das elektrische Feld erzeugte Phasenschub $\Delta\phi$ wird durch einen Polarisator in eine Modulation der Lichtintensität umgewandelt.

Um dieses fundamentale Konzept in einem Spannungssensor ausnutzen zu können, ist ein Sensormaterial mit den beiden folgenden Eigenschaften nötig: Erstens muss die Feldsensitivität des Materials linear vom elektrischen Feld E abhängen. Und zweitens darf das Material nur auf die Komponente des elektrischen Feldes, welche tangential zum Integrationsweg ist, sensitiv sein.

Der lineare elektro-optische Effekt (Pockels Effekt) in bestimmten kristallinen Materialien erfüllt diese Voraussetzungen. Zwei orthogonale, linear polarisierte Lichtwellen erfahren beim Durchlaufen eines elektro-optischen Kristalls einen differentiellen Phasenschub $\Delta\phi$, der proportional zur anliegenden elektrischen Feldstärke ist (Abbildung 2). Für Materialien der Kristallklasse $43m$ (T_d) ist der Phasenschub nur von der Feldkomponente parallel zum Lichtweg (z -Richtung) abhängig, vorausgesetzt eine der kubischen Kristallachsen ((100) -Richtung) liegt ebenfalls parallel zum Lichtweg [4]. Feldkomponenten in x und y -Richtung lassen $\Delta\phi$ unverändert. Felder von Nachbarphasen haben somit keinen Einfluss und das Messsignal wird nicht durch Störungen des elektrischen Feldes, z.B. durch Regen und Eis auf dem Isolierkörper beeinflusst. Der Phasenschub $\Delta\phi$ ist gegeben als

$$\Delta\phi(V) = \frac{\pi}{V_\pi} \int \vec{E} d\vec{s} \quad (2)$$

Die Halbwellenspannung $V_\pi = \frac{\lambda}{2n^3r}$ hängt ab von der Wellenlänge λ des Lichts und den Materialkonstanten des Kristalls (Brechungsindex n und maßgeblicher elektro-optischer Koeffizient $r = r_{41}$). Für unsere Untersuchungen verwendeten wir Bismutgermanat mit der Kristallzusammensetzung $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$. Diese hat einen elektro-optischen Koeffizienten $r_{41} = 1.11 \text{ pm/V}$ [5], woraus sich $V_\pi \sim 69 \text{ kV}$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1310 \text{ nm}$ ergibt.

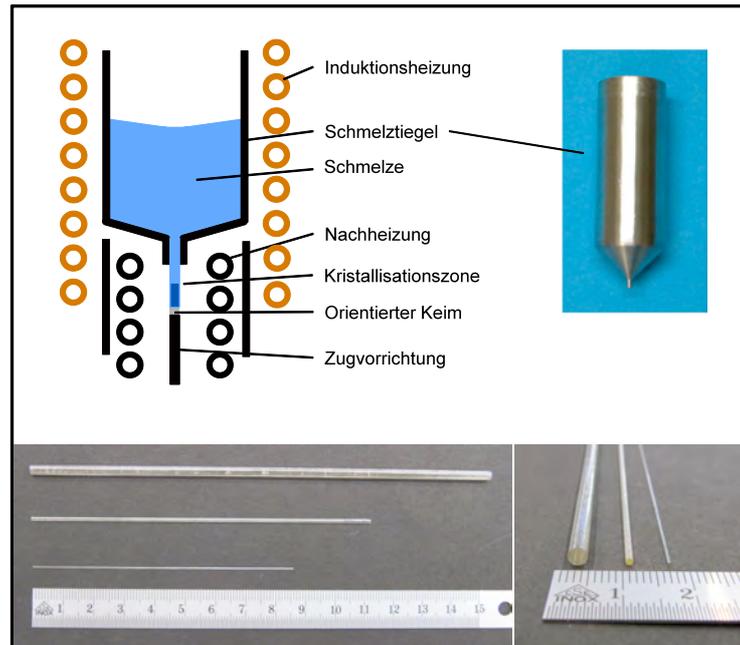


Abb 3: „Micro-pulling down“ Verfahren. Oben: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Herstellung der BGO Fasern. Unten: Drei mittels μ -PD Verfahren hergestellte BGO Fasern verschiedenen Durchmessers.

„Micro-pulling down“ Verfahren

Das „Micro-pulling down“ (μ -PD) Verfahren [6,7] unterscheidet sich von anderen Kristallzuchtmethoden, wie zum Beispiel dem Czochralski Verfahren oder dem „edge-defined film-fed growth“ (EFD) Verfahren, in der Tatsache, dass der Kristall aus einer Schmelze nach *unten* wächst. Das μ -PD Verfahren wurde bereits für die Herstellung von dünnen Kristallen und Kristallfasern aus verschiedensten Materialien verwendet, beispielsweise zur Herstellung von Saphirfasern [8] oder Fasern aus Nd-dotiertem $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) zur Verwendung in Lasern [9]. In dieser Studie beschreiben wir die Anpassung des Verfahrens, um kristalline BGO Fasern herzustellen.

Die für das μ -PD Wachstum von BGO Kristallen verwendete Apparatur ist in Abbildung 3 gezeigt. Die Ausgangsmaterialien werden bei einer Temperatur von ~ 1050 °C in einem speziell geformten Tiegel aus Platin mittels Induktionsheizung geschmolzen. Kristallwachstum wurde sowohl aus BGO- als auch Bi_2O_3/Ge_2O_2 -Schmelzen untersucht. Der Schmelztiegel ist von einer Keramikhülle umgeben, um eine gute thermische Isolierung und Homogenität der Temperaturverteilung zu erreichen. Das geschmolzene Material tritt durch eine Öffnung an der Unterseite des Schmelztiegels aus. Diese Öffnung kann im einfachsten Fall ein Loch sein oder aber auch eine speziell geformte Kapillare. Hierdurch werden der Durchmesser und die Form des Kristalls festgelegt. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch die Oberflächenspannung der Schmelze. Zu Beginn des Wachstumsprozesses wird ein ausgerichteter Kristall als Keim an das geschmolzene Material herangeführt, um die Orientierung der Kristallachsen festzulegen. Während des Wachstumsprozesses wird dieser Keim mittels einer Haltevorrichtung langsam mit einer kontrollierten Geschwindigkeit (< 1 mm/min) nach unten gezogen.

Während des gesamten Wachstumsprozesses müssen Temperaturgradienten nahe der Kristallisationszone so gering wie möglich gehalten werden, weil sonst Defekte in der Kristallstruktur auftreten können, sowie Spannungen in der Kristallfaser oder nahe ihrer Oberfläche eingefroren werden. Hierdurch würden die Lichtleitung in der Faser, der Polarisationszustand des Lichts und die Strahlqualität negativ beeinflusst. Deshalb ist eine genaue Kontrolle des Bereichs direkt unterhalb der Öffnung des Tiegels notwendig, um ein stabiles Kristallwachstum zu gewährleisten. Hierzu wird der Wachstumsprozess mit einer CCD Kamera überwacht. Zusätzlich wird die Temperatur der Kapillare mit einem Pyrometer gemessen und ein Nachheizer eingesetzt, um die Temperatur in der Kristallisationszone zu stabilisieren. Dieser Nachheizer reduziert zusätzlich thermische Gradienten und bewirkt ein gewisses Ausheilen des Materials („Annealing“), um die Entstehung von Störstellen und Spannungen zu minimieren. Weiterhin sind Maßnahmen erforderlich, um Verdampfen von Bi_2O_3 aus der Schmelze und somit eine Veränderung ihrer Zusammensetzung zu vermeiden.

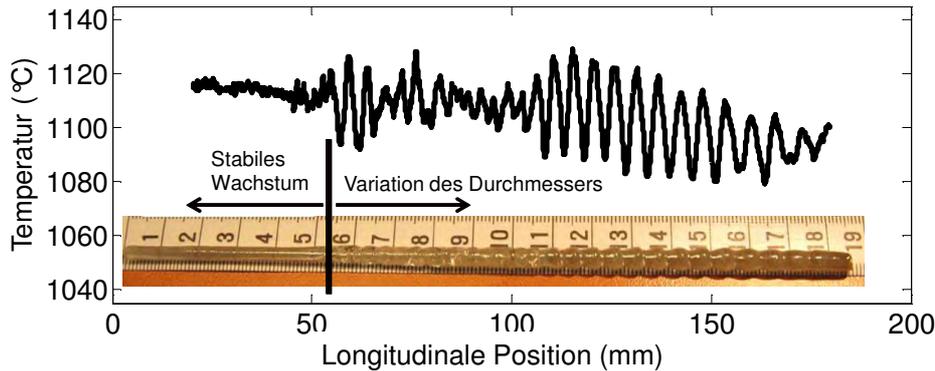


Abb 4: Einfluss von Variationen der Schmelztiegeltemperatur nahe der Kristallisationszone auf den Durchmesser des BGO Kristalles. Die Schmelztemperatur von BGO beträgt 1050 °C.

Ergebnisse

Mit dem μ -PD Verfahren stellten wir BGO Kristalle mit einer Länge von bis zu 850 mm bei Durchmessern im Bereich von 0.3 mm – 3 mm her (Abbildung 3; unten). Die Temperatur der Kristallisationszone muss in einem Fenster von ungefähr 10 °C gehalten werden, um einen einheitlichen Durchmesser über die gesamte Länge des Kristalls zu erreichen (Abbildung 4). Die optische Charakterisierung der Kristalle beinhaltete die Vermessung der Doppelbrechung auf Grund von mechanischer Spannung und Fehlstellen (ideale BGO-Kristalle sind doppelbrechungsfrei), die Orientierung der elektro-optischen Achsen und des Verhaltens unter angelegter elektrischer Spannung.

Ein Teilstück einer mittels μ -PD Verfahrens hergestellten BGO Faser guter optische Qualität (Durchmesser 3 mm, Länge 150 mm) lieferte folgende Ergebnisse: Die Doppelbrechung infolge von Defekten und mechanischen Spannungen war relativ gering und entsprach ca. 0.6 rad Phasenverzögerung. Der elektro-optische Phasenschub zwischen zwei orthogonal polarisierten Lichtwellen nahm bis zur maximal angelegten Versuchsspannung von 30 kV linear zu (Abbildung 5). Um die Genauigkeit der Kristallausrichtung zu überprüfen, wurde der Winkel α zwischen der longitudinalen Kristallachse und einem homogenen elektrischen Feld variiert (Abbildung 6). Bei korrekter Orientierung der Kristallachsen (longitudinale Zylinderachse parallel zur (100)-Richtung) ändert sich der elektro-optische Phasenschub (bei konstanter Spannung) proportional zum Absolutbetrag von $\cos(\alpha)$. Bei der untersuchten Faser ist hingegen das Signalminimum um 19.6° verschoben (Abbildung 6). Dies deutet auf eine Fehlausrichtung der Kristallachsen hin. Mittels Röntgenbeugung konnte diese Interpretation bestätigt werden. Höchstwahrscheinlich ist dieses Ergebnis auf eine Fehlausrichtung des Kristallkeimes zurückzuführen.

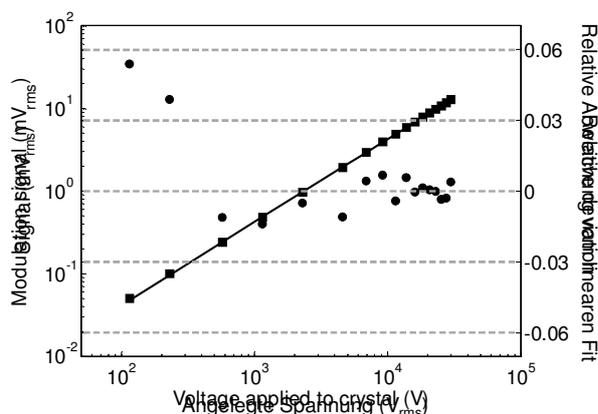


Abb 5: Elektro-optisches Signal einer 150 mm langen BGO Faser in Abhängigkeit der angelegten Spannung (Quadrate) und die relative Abweichung der Daten vom linearen Fit (Punkte)

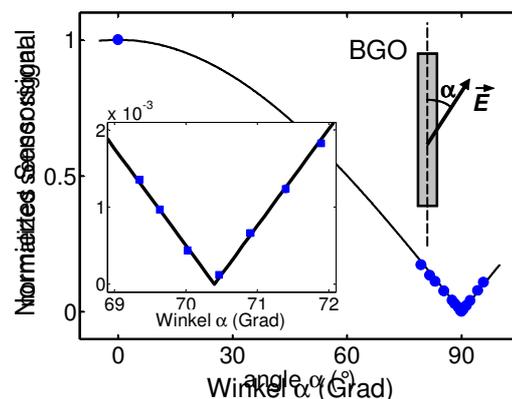


Abb 6: Sensorsignal in Abhängigkeit von der Richtung α des elektrischen Feldes. Punkte: Mittels Czochralski Verfahren hergestellter Referenzkristall. Quadrate: Der mittels μ -PD Verfahren hergestellter Kristall zeigt eine Abweichung von 19.6°.

Zusammenfassung und Ausblick

Dünne Kristalle und Fasern aus $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ wurden mittels „Micro-pulling down“ Verfahren hergestellt. Ihre optische Qualität war gut, so dass sie für die Messung von Hochspannungen verwendet werden konnten. Die so hergestellten BGO Fasern hatten noch keine Kern/Mantel Struktur, um Licht zu führen. Durch Verwendung eines konzentrischen Doppel-Schmelzriegels und Zugabe von geeigneten Dotiermaterialien (z.B. Ionen der Seltenen Erden) in die Schmelze [10] könnten optische Fasern mit einem entsprechenden Brechungsindexprofil hergestellt werden.

Referenzen

- [1] C. P. Yakymyshyn, M. A. Brubaker, P. M. Johnston, C. Reinbold, "Manufacturing challenges of optical current and voltage sensors for utility applications," *Proc. of SPIE: Sensors and Controls for Advanced Manufacturing*, **3201**, 2-19 (1997).
- [2] K. Shibata, "A fiber optic electric field sensor using the electro-optic effect of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$," *First International Conference on Optical Fibre Sensors, IEEE Conference Publication*, London, April 26-28, **221**, 164-168 (1983).
- [3] K. Bohnert, M. Ingold, and J. Kostovic, "Fiber-optic voltage sensor for SF6 gas-insulated high voltage switchgear," *Appl. Opt.*, **30**, 1926-1933 (1999).
- [4] L. Duvillaret, S. Riolland, and J.-L. Coutaz, "Electro-optic sensors for electric field measurements. II. Choice of the crystals and complete optimization of their orientation," *J. Opt. Sco. Am. B*, **19**, 2704-2715 (2002).
- [5] P.A. Williams, A.H. Rose, K.S. Lee, D.C. Conrad, G.W. Day, and P.D. Hale, "Optical, thermo-optic, electro-optic, and photoelastic properties of bismuth germanate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)," *Appl. Opt.*, **35**, 3562-3569 (1996).
- [6] A. Yoshikawa and V. Chani, "Growth of optical crystals by micro-pulling-down method," *MRS Bulletin*, **34**, 266-270 (2009).
- [7] T. Fukuda and V.I. Chani, "Shaped Crystals: Growth by micro-pulling-down technique," Springer, Berlin & Heidelberg (2007).
- [8] H. S. Fang, Z. W. Yan, and E. D., "Bourret-Courchesne, Numerical Study of the Micro-Pulling-Down Process for Sapphire Fiber," *Crystal Growth Des.*, **11**, 121-129 (2011).
- [9] V. I. Chani, A. Yoshikawa, Y. Kuwano, K. Hasegawa, and T. Fukuda, "Growth of $\text{Y}_3\text{A}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}$ fiber crystals by micro-pulling-down technique," *Journal of Crystal Growth*, **204**, 155-162 (1999).
- [10] S.G.Raymond, B.J.Luff,P.D.Townsend, X.Feng, and G.Hu, "Thermoluminescence spectra of doped $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ " *Rad. Measurements* **23**, 195-202 (1994).