

Germanium(*cF136*) – eine neue kristalline Modifikation des Germaniums mit poröser Clathrat-II-Struktur**

Thomas F. Fässler*

Stichwörter:

Allotropie · Elementstrukturen · Germanium · Käfigverbindungen · Zintl-Anionen

Professor Brigitte Eisenmann
zum 65. Geburtstag gewidmet

Elementstrukturen sind wegen der zu meist hohen Symmetrie der atomaren Anordnung besonders ästhetisch, und die Entdeckung neuer Modifikationen findet daher nicht nur in der Fachwelt große Beachtung. Die in dieser Hinsicht spektakulärsten Beiträge der jüngsten Vergangenheit waren sicherlich die Fullere, die dem Diamant und Graphit als neue Kohlenstoffmodifikation an die Seite gestellt werden konnten. Diese Entdeckung wurde mit dem Nobelpreis gewürdigt, doch erst die Möglichkeit, die neue Verbindungsklasse auch im präparativen Maßstab zu erhalten, ermöglichte eine rasante Entwicklung des Forschungsgebiets.^[1,2] Die Entdeckung neuer kristalliner Normaldruckmodifikationen anderer Elemente ist jedoch selten geworden und beschränkte sich in jüngster Zeit auf die Elemente Schwefel^[3] und Phosphor, wobei die Strukturaufklärung des roten, faserförmigen Phosphors besonders hervorzuheben ist.^[4]

Guloy et al. präsentierten nun kürzlich eine Clathrat-II-analoge Germaniumstruktur, die keine Fremdatome enthält („□₂₄Ge₁₃₆“) und infolgedessen eine neue Elementmodifikation, Ge(*cF136*), darstellt (IUPAC-Nomenklatur, siehe unten).^[5] Dieser überraschende Befund ist vor allem deshalb bedeutungsvoll, weil nanostrukturiertes

Germanium – auch in Kombination mit Silicium – in der Photovoltaik und als Bestandteil siliciumbasierter optoelektronischer Bauelemente als eine vielversprechende Alternative zu etablierten Materialien angesehen wird.^[6–9]

Außer dem bekannten α -Germanium mit Diamantstruktur [Ge-I, Ge(*cF8*)] war bisher auch eine Reihe von Hochdruckmodifikationen des Germaniums strukturell charakterisiert worden.^[10] In Tabelle 1 sind die Strukturen, die bei Normaldruck bestimmt wurden, der von β -Ge gegenübergestellt. α -Germanium wandelt sich unter Druck in die tetragonale metallische β -Form um [Ge-II, Ge(*tI4*), mit β -Sn-Struktur]. Bei Anwendung noch höherer Drücke und anschließend Relaxieren entstehen die beiden Modifikationen γ -Germanium [Ge-III, Ge(*tP12*)] und δ -Germanium [Ge-IV, Ge(*cI16*)].^[11,12] In den Strukturen dieser beiden Modifikationen weichen die Bindungswinkel der durchweg vierfach koordinierten Ge-Atome stark vom idealen Tetraeder-

winkel ab. γ -Germanium kristallisiert in einer dreidimensionalen Struktur aus gewellten 5- und 7-Ringen, in δ -Germanium liegen 6-Ringe vor. Das unter Normalbedingungen gemessene Atomvolumen dieser beiden Modifikationen ist erwartungsgemäß etwas kleiner als das von α -Germanium. Außerdem sind eine Reihe weiterer Hochdruckmodifikationen mit noch kleineren Atomvolumina bekannt.^[13]

Bei Ge(*cF136*) handelt es sich dagegen um eine neue kristalline Normaldruckmodifikation, die über eine einfache Syntheseroute in guter Ausbeute und damit in ausreichender Menge für eine problemlose Strukturbestimmung und Untersuchung der elektronischen Eigenschaften hergestellt wurde. Für das kürzlich ebenfalls über eine einfache Syntheseroute – die topotaktische Reaktion von Li₁₂Ge₁₂ mit Oxidationsmitteln – hergestellte „allo-Germanium“, das sich bei 147°C zu „4H-Ge“ umlagert, sind zwar Metrik und Zellabmessungen bekannt, doch die

Tabelle 1: Die mittels Lageparameter der Atome beschriebenen Germaniumallotrope sowie *allo*-Ge und 4H-Ge.

Bezeichnungen der Allotrope	Pearson-Symbol	Raumgruppe	Atomvolumen [Å ³]	Abstände zwischen nächsten Nachbarn [Å]	Bindungswinkel [°]
α -Ge, I (Diamant)	<i>cF8</i>	<i>Fd3m</i>	22.63	2.445	109.5
β -Ge, II (β -Sn)	<i>tI4</i>	<i>I4₁/amd</i>	16.05 ^[a]	2.533–2.692	74.5–105.5
γ -Ge, III (ST12)	<i>tP12</i>	<i>P4₁2₁2</i> <i>P4₃2₁2</i>	20.45	2.479–2.489	98–135
δ -Ge, IV (BC8)	<i>cI16</i>	<i>Ia3</i>	20.71	2.421–2.469	99.0–117.6
ϵ -Ge, V (Clathrat-II) ^[b]	<i>cF136</i>	<i>Fd3m</i>	25.88	2.435–2.492	106.1–119.9
<i>allo</i> -Ge ^[c]	<i>oP128</i>	<i>Pmc2₁</i>	24.06		
4H-Ge ^[d]	<i>hP8</i>	<i>P6₃mc</i>	22.58		

[a] Bei 120 kbar. [b] $a=15.2115$ Å. Wyckoff-Lage und Atomparameter: $8a$ (7/8, 7/8, 7/8), $32e$ (0.7815, x , x) und $96c$ (0.81667, x , 0.6296). [c] Stark packungsgestört. [d] Indiziertes Pulverdiffraktogramm.

[*] Prof. Dr. T. F. Fässler
Department Chemie
Technische Universität München
Lichtenbergstraße 4, 85747 Garching
(Deutschland)
Fax: (+49) 89-289-13186
E-Mail: thomas.faessler@lrz.tum.de

[**] Ich danke Andreas Kaltzoglou für die Anfertigung von Bildern und Dr. Annette Schier für die Durchsicht des Manuskripts.

Strukturen sowohl von „allo-Ge“ als auch von „4H-Ge“ sind bisher nur näherungsweise beschrieben.^[14]

Germanium-Nanopartikel können vergleichsweise gut mit physikalischen oder chemischen Methoden erzeugt werden, wobei die zweite Variante bisher wenig untersucht wurde.^[15] Beschrieben wurde die metallinduzierte Bildung von Ge-Nanopartikeln durch Abscheidung aus der Gasphase^[16,17] (CVD; chemical vapor deposition) oder durch Rekristallisation in dünnen Schichten;^[18] demgegenüber führten CVD-Experimente mit $\text{Ge}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$ als Vorstufe^[19] oder die goldinduzierte Zersetzung von $\text{Ge}(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{H}_2$ in überkritischem Cyclohexan zur Bildung von Ge-Nanodrähten.^[16] Bei der Reaktion von Mg_2Ge mit GeCl_4 entstand „meso-strukturiertes Germanium mit kubischen Poren“,^[20] und die Oxidation von Zintl-Anionen $[\text{Ge}_9]^{4-}$ in Gegenwart oberflächenaktiver Komponenten führte zu einem Material, das als „hexagonal nanoporöses Germanium“ bezeichnet wurde.^[21] In keinem Fall bildete sich eine geordnete Struktur der erhaltenen Materialien aus, und auch Sauerstoff- oder Kohlenstoffverunreinigungen können bisher nicht ausgeschlossen werden.

Das neue $\text{Ge}(cF136)$ wurde durch Oxidation von Zintl-Anionen in einer ionischen Flüssigkeit in kristalliner Form erhalten. Ein glücklicher Umstand war dabei, dass das von Guloy et al. verwendete Lösungsmittel – eine 1:1-Mischung aus Dodecyltrimethylammoniumchlorid und Aluminiumtrichlorid – als Oxidationsmittel für die Zintl-Anionen fungierte. Die oxidative Kupplung von $[\text{Ge}_9]^{4-}$ -Anionen zu dimeren, oligomeren und polymeren Einheiten wurde schon früher eingehend untersucht. Diese Ionen entstehen durch Lösen von binären Phasen der nominellen Zusammensetzung A_4Ge_9 ($\text{A} = \text{Na} - \text{Cs}$) in Ethylendiamin. Die Strukturen der Ausgangsverbindungen sind nur für $\text{A} = \text{K}$ und Cs bekannt,^[22–24] und das entsprechende Na_4Ge_9 , das zur Synthese von $\text{Ge}(cF136)$ eingesetzt wurde, ist bisher nur schlecht charakterisiert.

Aus den Ethylendiamin-Lösungen der binären Phasen können außer Salzen mit $[\text{Ge}_9]^{4-}$ - und $[\text{Ge}_9]^{3-}$ -Anionen^[25–27] auch solche mit dimeren anionischen Einheiten $[\text{Ge}_9 - \text{Ge}_9]^{6-}$ erhalten werden (Abbildung 1 a).^[28–30] Die Syn-

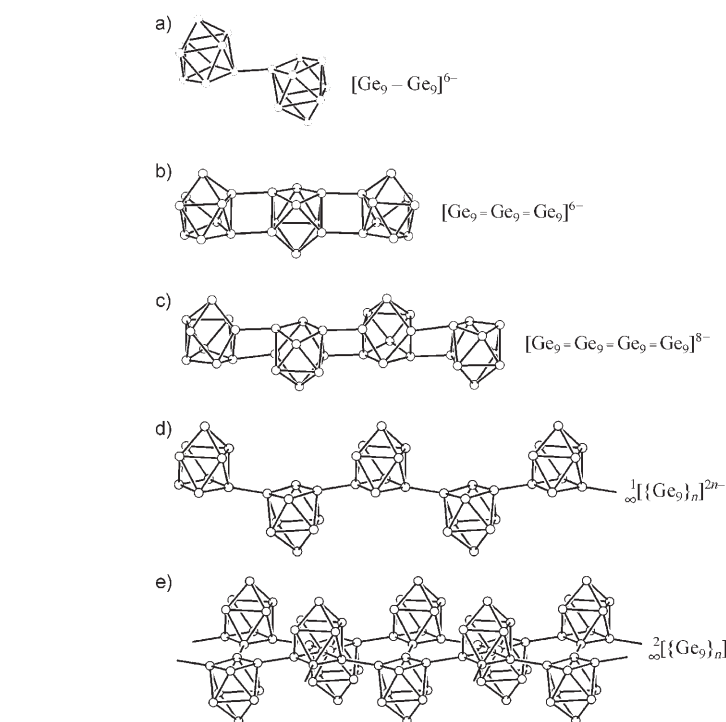


Abbildung 1. Strukturen verknüpfter $[\text{Ge}_9]$ -Cluster. a) Dimer $[\text{Ge}_9 - \text{Ge}_9]^{6-}$; b) Trimer $[\text{Ge}_9 = \text{Ge}_9 = \text{Ge}_9]^{8-}$; c) Tetramer $[\text{Ge}_9 = \text{Ge}_9 = \text{Ge}_9 = \text{Ge}_9]^{8-}$; d) Polymer $\frac{1}{2}[\{\text{Ge}_9\}_n]^{2n-}$; e) hypothetische Struktur von $\frac{2}{3}[\{\text{Ge}_9\}_n]$.

these der dimeren Einheiten gelingt auch mit Dimethylformamid statt Ethylendiamin als Lösungsmittel.^[31] Diese Bildung von Dimeren ausgehend von $[\text{Ge}_9]^{4-}$ kann als der erste Schritt einer oxidativen Kupplung angesehen werden.

Ein durch weitere Oxidation von $[\text{Ge}_9]^{4-}$ formal gebildetes „ $[\text{Ge}_9]^{2-}$ “, das bisher noch nicht gefasst werden konnte, kann auf verschiedene Weise stabilisiert werden: Neben trimeren $[\text{Ge}_9 = \text{Ge}_9 = \text{Ge}_9]^{6-}$ - und tetrameren $[\text{Ge}_9 = \text{Ge}_9 = \text{Ge}_9 = \text{Ge}_9]^{8-}$ -Einheiten^[32–35] entsteht auch ein polymeres Anion $\frac{1}{2}[\{\text{Ge}_9\}_n]^{2n-}$ (Abbildung 1 b–d).^[36,37] Die Existenz von monomerem $[\text{Ge}_9]^{2-}$ wird zwar vermutet,^[38] doch ließen sich Verbindungen, die $[\text{Ge}_9]^{2-}$ enthalten könnten, wegen einer ausgeprägten Fehlordnung ihres Anions nicht strukturell charakterisieren. Als Gegenionen für diese Polyanionen fungierten bisher fast ausschließlich $[\text{A}(2.2.2\text{-crypt})]^+$ oder $[\text{A}([18]\text{Krone-6})]^+$ ($\text{A} = \text{Na} - \text{Cs}$). Eine konsequente Fortsetzung dieser oxidativen Kupplung könnte zwar im Prinzip zu einer ungeladenen, schichtartig aus $[\text{Ge}_9]$ -Einheiten aufgebauten Germaniumstruktur führen (Abbildung 1 e),^[39] jedoch gibt es hierfür bisher keinen Nachweis.

Das von Guloy et al. erhaltene $\text{Ge}(cF136)$ kristallisiert in der kubischen Clathrat-II-Struktur. Diese leitet sich von der Zeolith-ZSM-39-Struktur durch Austausch der $\text{MO}_{2/4}$ -Einheiten ($\text{M} = \text{Si}, \text{Al}$) gegen Ge-Atome ab. Die Bezeichnung von Elementpolymorphen nach IUPAC gibt die Kristallklasse (cF = kubisch flächenzentriert) sowie die Zahl der Atome pro Elementarzelle (136) an. Die dreidimensionale Struktur der neuen Modifikation ist aus zwei unterschiedlichen Ge-Polyedern aufgebaut. Dabei handelt es sich um Ge_{20} -Pentagondodekaeder (pdod), $[\text{5}^{12}]$, und Ge_{28} -Hexakaidekaeder (hkad), $[\text{5}^{12}6^4]$ (Abbildung 2 a und d), die über gemeinsame Pentagone zu einem dreidimensionalen Raumnetz aus Ge-Atomen verknüpft sind. Die durch diese Anordnung gebildeten, unterschiedlich großen Hohlräume sind zwar prinzipiell in der Lage, Na^+ oder Cs^+ aufzunehmen,^[40] doch sind diese Lücken in $\text{Ge}(cF136)$ nicht besetzt. Das neue Allotrop kristallisiert in der Raumgruppe $Fd\bar{3}m$ (Nr. 227) mit einem Gitterparameter $a = 15.2115 \text{ \AA}$.

Die Struktur wurde durch Pulverröntgenbeugung und Transmissionselektronenmikroskopie aufgeklärt und die Abwesenheit von Gastatomen zu-

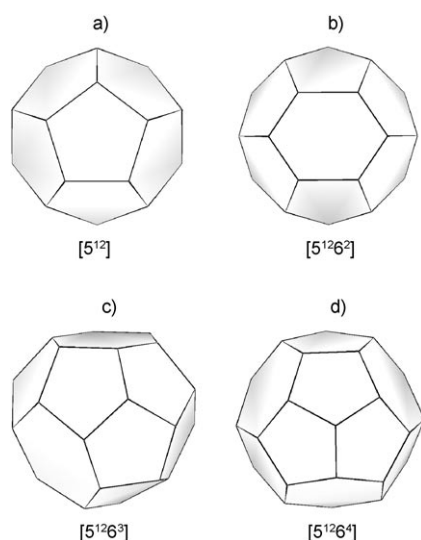


Abbildung 2. Polyeder aus dreidimensional verknüpften Baugruppen in den Strukturen von Clathrat-I, -II und -III: a) Pentagondodekaeder (pdod) aus 20, b) Tetraikaidekaeder (tkad) aus 24, c) Pentakaidekaeder (pkad) aus 26, d) Hexakaidekaeder (hkad) aus 28 Atomen. Die Ausdrücke unter den Teilabbildungen geben jeweils die Zahl der Pentagone und Hexagone der Polyeder an.

sätzlich durch EEL-Spektren (EEL = electron energy-loss) nachgewiesen. Wie erwartet ist das mittlere Atomvolumen größer als bei den anderen Modifikationen des Germaniums (Tabelle 1). Die Modifikation ist metastabil gegenüber α -Ge (Umwandlungstemperatur 420 °C), diamagnetisch und halbleitend, mit einer Bandlücke von 0.6 eV.

In $\text{Ge}(cF136)$ bilden die pdod eine dreidimensionale Struktur (Abbildung 3a), die als hierarchische Variante der kubischen Laves-Phase MgCu_2 (Abbildung 3c) verstanden werden kann, wobei jedes Cu-Atom durch ein pdod und jedes Mg-Atom durch ein hkad zu ersetzen ist. Die pdod bzw. Cu-Atome bilden zu Kagomé-Netzen äquivalente Schichten (Schläfli-Symbol: 3.6.3.6, Abbildung 3c und 3d), die entlang der Raumdiagonalen analog einer kubischen dichtesten Atompackung mit Stapelfolge ABC... angeordnet sind (Abbildung 3a).^[41,42] Zwei dieser Schichten sind mit Blick entlang der Schichten bzw. entlang der Raumdiagonalen in Abbildung 3b bzw. e gezeigt. Diese Schichten werden untereinander durch weitere pdod-Einheiten über den Dreiecken der Kagomé-artigen Schichten verknüpft (gelbe pdod in Abbil-

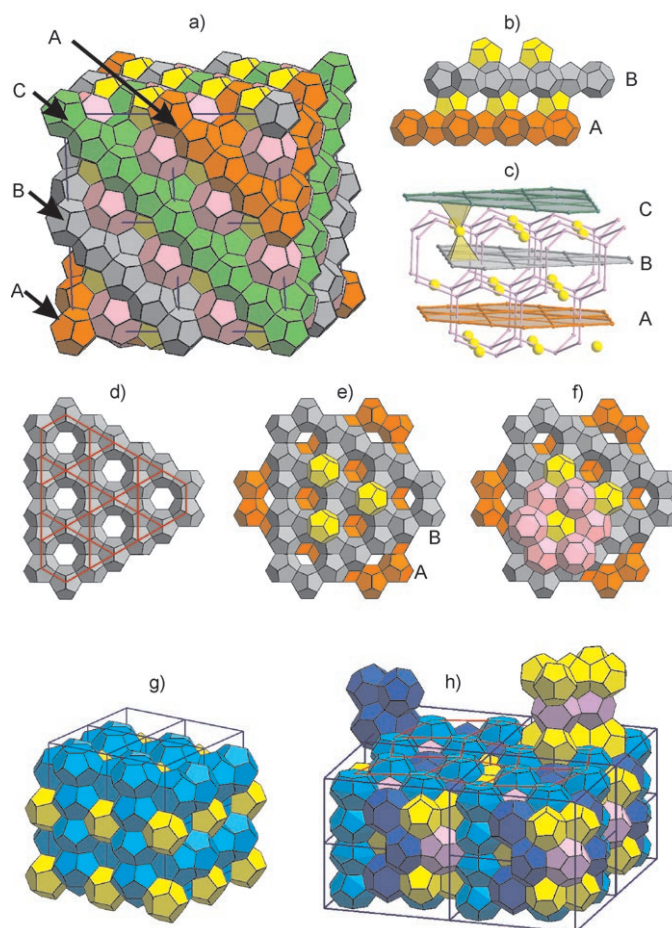


Abbildung 3. Strukturen und Strukturausschnitte verschiedener Clathrate. Pentagondodekaeder (pdod) sind orange, grau, grün und gelb dargestellt. a) Clathrat-II ($2 \times 2 \times 2$ -Elementarzellen) mit Bezeichnung der in Richtung der Raumdiagonalen gestapelten Schichten A, B und C aus pdod; b) Seitenansicht entlang den Schichten A und B; c) kubische Laves-Phase MgCu_2 . Kagomé-Netze aus Cu-Atomen (orange, grau, grün), deren Dreiecke unter Bildung spitzenverknüpfter Tetraeder mit Cu-Atomen (gelb) überdacht sind. Die Mg-Atome bilden die Diamantstruktur (lila). d) Kagomé-Netz aus pdod; e) analog zu (d) mit verbindenden pdod [vgl. (b)]; f) wie in (e) mit zusätzlich eingezeichneten Hexakaidekaedern (hkad, rosa), die untereinander ein Diamant-analoges Netz bilden; g) Clathrat-I-Struktur ($2 \times 2 \times 2$ -Elementarzellen); h) Clathrat-III-Struktur ($2 \times 2 \times 2$ -Elementarzellen) mit Betonung auf den Strängen aus T1-Polyedern (hellblau), die als Stabpackung in Form verzerrter Quadrate und Rhomben angeordnet sind. Super-Tetraeder aus T2-Polyedern (dunkelblau) bilden eine lineare Kette; Gruppen aus fünf pdod (gelb) sowie zwei pkad (violett).

dung 3b, e und f). Die hkad (rosa Polyeder in Abbildung 3f) sind über vier hexagonale Flächen untereinander verknüpft. Sie bilden in Analogie zum Netzwerk der Mg-Atome in MgCu_2 (lila) eine diamantartige dreidimensionale Struktur aus und füllen die hexagonalen Lücken des Kagomé-Netzes. Durch gemeinsame pentagonale Flächen der beiden Polyedertypen wird eine lückenlose Parkettierung des Raumes erreicht. Die mittleren Atomabstände sind mit denen von α -Ge vergleichbar. Die kleineren Abstände sind um ca. 0.05 Å kleiner, die größeren Abstände

sind vergleichbar mit denen im „gefüllten“ Clathrat $\text{Cs}_8\text{Na}_{16}\text{Ge}_{136}$.^[40]

Mithilfe quantenmechanischer Rechnungen haben Nesper et al. bereits früher den Zusammenhang zwischen hypothetischen Kohlenstoffmodifikationen mit vierbindigen Atomen und den Gerüststrukturen der Zeolithe aufgezeigt.^[43] Sie fanden, dass Kohlenstoffgerüste, die von den Strukturtypen Zeolith ZSM-23 (Clathrat-I), Zeolith ZSM-39 (Clathrat-II), Zeolith Theta-1, Melanophlogit und Bikitait abgeleitet werden können, stabiler als C_{60} sind. Die für Germanium gefundene $\text{Ge}(cF136)$ -

Struktur (Clathrat-II) ist den Rechnungen zufolge auch für Kohlenstoff die stabilste Strukturvariante nach der Diamantstruktur. Die Clathrat-I-Struktur (Abbildung 3 g) liegt energetisch nur wenig über der von Clathrat-II.

Im Clathrat-I bilden Tetrakaidekeder (tkad, Abbildung 2b) eine dreidimensionale Struktur, indem sie sich zunächst über gemeinsame hexagonale Flächen zu eindimensionalen Strängen zusammenlagern. Wegen der kubischen Symmetrie verlaufen diese Stränge orthogonal zueinander (eine hierarchische Variante des Cr_3Si -Typs) und sind über gemeinsame pentagonale Flächen miteinander verknüpft. Die resultierenden Lücken sind isoliert voneinander und haben die Form eines pdod (Abbildung 3 g).

Die Clathrat-III-Struktur ist ebenfalls eine interessante Strukturvariante für vierbindige Atome,^[41,44] da in dieser Struktur kleinere Polyeder am Gerüstaufbau beteiligt sind. Wie bei der Clathrat-I-Struktur bildet eine Sorte tkad (T1) über hexagonale Flächen Stränge, wodurch in Bezug auf die Mittelpunkte der hexagonalen Flächen Muster aus leicht verzerrten Quadraten und Rhomben entstehen (hellblaue tkad in Abbildung 3 h). Die resultierenden kanalartigen Hohlräume sind mit unterschiedlichen Polyedertypen gefüllt. Die quasi-vierzähligen Hohlräume enthalten Ketten aus kantenverknüpften Tetraedern eines zweiten Typs von tkad (T2), die als hierarchische Defektvariante des Si_2S_2 -Strukturtyps anzusehen sind, wobei die tkad die Rolle der S-Atome übernehmen und paarweise über gemeinsame hexagonale Flächen verknüpft sind (Abbildung 3 h, dunkelblau gezeichnete tkad). Die beiden unterschiedlichen tkad haben gemeinsame pentagonale Flächen. Die C_2 -symmetrischen Kanäle der Rhomben können durch eine Polyederkette beschrieben werden, in der sich entlang c eine Gruppe aus fünf untereinander verknüpften pdod-Einheiten und eine Einheit aus zwei Pentakaidekädern (pkad) abwechseln (gelbe pdod und lila pkad in Abbildung 3 h). Die pkad haben drei verzerrt hexagonale Flächen (Abbildung 2 c), die mit dreizähliger Pseudosymmetrie auch noch an die Hexagone der T2-Polyeder angrenzen.

Im Allgemeinen wird die Untersuchung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen an nanoskopischen Materialien dadurch erschwert, dass zum einen eine statistische Partikelgrößenverteilung zu berücksichtigen ist und zum anderen die chemische Zusammensetzung dieser Materialien häufig nicht exakt definiert ist. Die Synthese einer neuen kristallinen Germaniummodifikation mit Zeolith-analogen großen Hohlräumen über gut zugängliche Vorstufen lässt eine interessante Folgechemie erwarten, die auch zu einem besseren Verständnis der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen beitragen kann. Die vorgestellten Strukturvarianten sind möglicherweise auch für das Element Silicium realisierbar. Eine entsprechende Vorstufe, die ebenfalls neunatomige Clusterionen enthält, ist schon bekannt.^[45,46]

Online veröffentlicht am 27. Februar 2007

- [1] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, *Nature* **1985**, *318*, 162.
- [2] W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *Nature* **1990**, *347*, 354.
- [3] Bis dato sind 18 kristallographisch charakterisierte Normaldruckmodifikation des Schwefels bekannt (S_n mit $n = 6-15, 18, 20, \infty$). Siehe z.B. R. Steudel, O. Schumann, J. Buschmann, P. Luger, *Angew. Chem.* **1998**, *110*, 2502; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1998**, *37*, 2377 und zit. Lit.
- [4] M. Ruck, D. Hoppe, B. Wahl, P. Simon, Y. K. Wang, G. Seifert, *Angew. Chem.* **2005**, *117*, 7788; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 7616.
- [5] A. M. Guloy, R. Ramlau, Z. Tang, W. Schnelle, M. Baitinger, Y. Grin, *Nature* **2006**, *443*, 320.
- [6] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, M. Ichikawa, *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *88*, 253102.
- [7] R. Lechner, M. Buschbeck, M. Gjukic, M. Stutzmann, *Phys. Status Solidi C* **2004**, *5*, 1131.
- [8] M. Zacharias, P. M. Fauchet, *Appl. Phys. Lett.* **1997**, *71*, 380.
- [9] T. Takagahara, K. Takeda, *Phys. Rev. B* **1992**, *46*, 15578.
- [10] P. Villars, *Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases, Desk Edition*, ASM International, Materials Park, OH (USA), **1997**.
- [11] J. Donohue, *The Structures of the Elements*, Wiley, New York, **1982**.
- [12] R. J. Nemes, M. I. McMahon, N. G. Wright, D. R. Allan, J. S. Loveday, *Phys. Rev. B* **1993**, *48*, 9883; U. Schwarz, *Z. Kristallogr.* **2004**, *219*, 376.
- [13] K. Takemura, U. Schwarz, K. Syassen, N. E. Christensen, M. Hanfland, D. L. Novikov, I. Loa, *Phys. Status Solidi B* **2001**, *223*, 385.
- [14] A. Grüttner, R. Nesper, H.-G. von Schnering, *Angew. Chem.* **1982**, *94*, 933; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1982**, *21*, 912; A. Grüttner, Dissertation, Universität Stuttgart, **1982**.
- [15] Y. Maeda, N. Tsukamoto, Y. Yazawa, Y. Kanemitsu, Y. Masumoto, *Appl. Phys. Lett.* **1991**, *59*, 3168.
- [16] T. Hanrath, B. A. Korgel, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 1424.
- [17] M. Veith, S. J. Kniep, A. Jungmann, S. Hüfner, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1997**, *623*, 1507.
- [18] W. Chen, J. K. L. Lai, C. H. Shek, H. D. Chen, *Appl. Surf. Sci.* **2005**, *250*, 3.
- [19] S. Mathur, H. Shen, V. Sivakov, U. Werner, *Chem. Mater.* **2004**, *16*, 2449.
- [20] G. S. Armatas, M. G. Kanatzidis, *Nature* **2006**, *441*, 1122.
- [21] D. Sun, A. E. Riley, A. J. Cadby, E. K. Richmann, S. D. Korlann, S. H. Tolbert, *Nature* **2006**, *441*, 1126.
- [22] H. G. von Schnering, M. Baitinger, U. Bolle, W. Carrillo-Cabrera, J. Curda, Y. Grin, F. Heinemann, J. Llanos, K. Peters, A. Schmeding, M. Somer, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1997**, *623*, 1037.
- [23] V. Quéneau, S. C. Sevov, *Angew. Chem.* **1997**, *109*, 1818; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1997**, *36*, 1754.
- [24] S. Ponou, T. F. Fässler, *Z. Anorg. Allg. Chem.*, DOI: 10.1002/zaac.200600308.
- [25] C. Downie, J.-G. Mao, A. M. Guloy, *Inorg. Chem.* **2001**, *40*, 4721.
- [26] C. H. E. Belin, J. D. Corbett, A. Cisar, *J. Am. Chem. Soc.* **1977**, *99*, 7163.
- [27] T. F. Fässler, M. Hunziker, *Inorg. Chem.* **1994**, *33*, 5380.
- [28] L. Xu, S. C. Sevov, *J. Am. Chem. Soc.* **1999**, *121*, 9245.
- [29] R. Hauptmann, T. F. Fässler, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2003**, *629*, 2266.
- [30] R. Hauptmann, T. F. Fässler, *Z. Kristallogr. New Cryst. Struct.* **2003**, *218*, 461.
- [31] A. Nienhaus, S. D. Hoffmann, T. F. Fässler, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2006**, *632*, 1752.
- [32] A. Ugrinov, S. C. Sevov, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 10990.
- [33] L. Yong, S. D. Hoffmann, T. F. Fässler, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2005**, *631*, 1149.
- [34] A. Ugrinov, S. C. Sevov, *Inorg. Chem.* **2003**, *42*, 5789.
- [35] L. Yong, S. D. Hoffmann, T. F. Fässler, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2004**, *630*, 1977.
- [36] A. Ugrinov, S. C. Sevov, *C. R. Chim.* **2005**, *8*, 1878.

- [37] C. Downie, Z. Tang, A. M. Guloy, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 346; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 338.
- [38] T. F. Fässler, M. Hunziker, M. Spahr, H. Lueken, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2000**, *626*, 692.
- [39] T. F. Fässler, *Angew. Chem.* **2001**, *113*, 4289; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 4161.
- [40] C. Cros, M. Pouchard, P. Hagenmüller, *J. Solid State Chem.* **1970**, *2*, 570; S. Bobev, S. C. Sevov, *J. Am. Chem. Soc.* **1999**, *121*, 3795.
- [41] K. A. Kovnir, A. V. Shevelkov, *Russ. Chem. Rev.* **2004**, *73*, 923.
- [42] W. Carrillo-Cabrera, N. Caroca-Canales, H.-G. von Schnering, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **1994**, *620*, 247.
- [43] R. Nesper, K. Vogel, P. E. Blöchl, *Angew. Chem.* **1993**, *105*; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1993**, *32*, 701.
- [44] M. O'Keeffe, G. B. Adams, O. F. Sankey, *Philos. Mag. Lett.* **1998**, *78*, 21.
- [45] V. Quéneau, E. Todorov, S. C. Sevov, *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 3263.
- [46] H. G. von Schnering, M. Somer, M. Kaupp, W. Carrillo-Cabrera, M. Baitinger, A. Schmeding, Y. Grin, *Angew. Chem.* **1998**, *110*, 2507; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1998**, *37*, 2359.



Durchblick

mit Wiley-VCH Lehrbüchern



33211702_bu

PETER W. ATKINS und LORETTA JONES
Chemie – einfach alles
 2., völlig neu überarbeitete Aufl.

Die zweite Auflage knüpft nahtlos an den Erfolg ihres Vorgängers an: Für die Vermittlung des gesamten Basiswissens in der Chemie ist dieser Titel einfach ein Allrounder. Mit Recht kann man dieses Werk als drei Lehrbücher in einem bezeichnen, das die Allgemeine und Anorganische, Organische und Physikalische Chemie abdeckt. Ausgehend von der Organisation der Atome werden die komplexeren Eigenschaften und Wechselwirkungen der Materie entwickelt. Die Darstellung von Thermodynamik und Gleichgewichten legt die Grundlage für das Verständnis der Gleichgewichtskonstante und für die Kinetik chemischer Reaktionen. Der Lernstoff ist didaktisch geschickt mit vielen exzellenten Farbbildern illustriert, so dass Studierende, Professoren und Naturwissenschaftler aller Fächer mit diesem Buch ein fundiertes Chemiewissen erwerben oder auffrischen können.

9783-527-31579-6 2006 1107 S. Gebunden € 65,- /SFr 104,-

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61
 D-69451 Weinheim
 Tel. +49 (0) 62 01-606-400

Fax +49 (0) 62 01-606-184
 E-Mail: service@wiley-vch.de
www.wiley-vch.de


WILEY-VCH

