

誘電ボロメータ型赤外線センサの開発

Development of Infrared Sensor of Dielectric Bolometer Mode

村上 修一* 宮本 哲雄** 野村 哲男***
Shuichi Murakami Tetsuo Miyamoto Tetsuo Nomura
 井上 幸二* 野田 実**** 奥山 雅則****
Kouji Inoue Minoru Noda Masanori Okuyama

(2002年7月9日 受理)

Ba(Ti,Sn)O₃ (BTS) ferroelectric thin film was newly prepared by metal organic decomposition method for application in our proposed infrared sensor of dielectric bolometer mode. The sensor has merits of: 1) room temperature operation, 2) low power dissipation, and 3) chopper-less construction. Highly (110) oriented perovskite BTS thin film was successfully crystallized; it demonstrated a high temperature coefficient of dielectric constant of 2.7 %/K (at 20 °C). The infrared sensor with BTS thin film exhibits thermal responsivity R_v and specific detectivity D^* to be 150 V/W and 3.5×10^8 cmHz^{1/2}/W, respectively. Therefore, BTS thin film clearly demonstrated its potential as a candidate material for infrared sensor.

キーワード: 赤外線, 熱型赤外線センサ, 誘電ボロメータ型, MEMS, 強誘電体薄膜, Ba(Ti,Sn)O₃

1. はじめに

赤外線センサは物体から放射される赤外線エネルギーを検知するので, 昼夜の区別なく物体の存在や温度の情報を非接触で得ることができる。この特徴から家電製品, 防犯・防災, 自動車など様々な分野で活用されている。赤外線センサは量子型と熱型に大別され, 高感度・高解像度を実現させた赤外線イメージセンサとして, 1980年代から狭バンドギャップ半導体やPI Si

ショットキバリアを用いた量子型赤外線センサが主流の地位を占めてきた。しかしながら, 冷却機を必要とするため大型で高価格, 消費電力が高くなる等の欠点がある。一方, 熱型赤外線センサでは感度は量子型赤外線センサよりやや劣るものの, 冷却が不要であり, 価格, 消費電力, 寿命, メンテナンスの面で優位性を有していることから最近大きな注目を集めている。熱型赤外線センサは赤外線吸収による受光部の温度上昇を電気信号に変換するが, その方式は焦電型¹⁾, サーマパイル型²⁾, 抵抗ボロメータ型³⁾, 誘電ボロメータ型⁴⁾など多岐に渡っている。

これまでに筆者らは, 熱型赤外線センサの中でもとりわけ, 低消費電力, 構造の簡便さ(チョッパなど機械的可動部を必要としない)を特長とし, かつ今後さ

* 材料技術部 電子デバイスグループ

** 平成13年度客員研究員, 現日本電子株式会社

*** 立命館大学大学院

**** 大阪大学大学院

らなる高感度化が期待できる誘電ポロメータ型に注目し、センサ材料として $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ (BST) 強誘電体薄膜を用いた赤外線イメージセンサの試作を行ってきた。主な成果として、(1) 赤外線検知用強誘電体薄膜の開発⁵⁾、(2) 赤外線検知部の MEMS 加工技術による熱絶縁構造の作製⁶⁾、(3) センサ部と信号読み出し用 MOSFET 回路の一体化作製⁷⁾、(4) 赤外線イメージセンサを実現するための画像信号処理システムの開発^{8) 9)} に関して得た知見を既に報告している。

今回、誘電ポロメータ型赤外線センサのセンサ材料として、 $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$ (BTS) 強誘電体薄膜を新規に開発し、赤外線応答特性を調べたところ、今まで以上の高感度性を示すことが分かった。本論文では、誘電ポロメータ型赤外線センサの構造とプロセスを概観した上で、BTS 強誘電体薄膜の最適な成膜法、試作した赤外線単素子センサの特性について得られた知見を報告する。

2. 誘電ポロメータ型赤外線センサの原理と試作プロセス

(1) 赤外線検知原理

誘電ポロメータ型赤外線センサは、赤外線吸収による赤外線検知部の温度変化をセンサ材料の誘電率変化として捉え、電気信号として検出する。図 1 に単素子赤外線検出回路を示す。容量 - 容量直列分割回路となっており、赤外線検知用キャパシタ (容量) と参照用キャパシタに振幅が等しく互いに位相を反転させた 1 対の正弦波電圧を印加する。赤外線未照射時に赤外線検知用キャパシタと参照用キャパシタの電気容量が等しくなるように作製すると、赤外線照射時に赤外線検知用キャパシタの容量変化が生じ出力電圧が得られる。同出力電圧はソースフォロワ回路により低インピーダンス化される。上記より、誘電ポロメータ型赤外線センサではわずかな温度変化に対しセンサ材料の誘電率が大きく変化することが感度向上のための重要なポイントであることが分かる。なお、本研究では赤外線検知用キャパシタと参照用キャパシタの誘電特性と多面素化した際のフレームレートの関係から駆動用正弦波電圧の振幅と周波数はそれぞれ 3 V, 1 kHz とした。

(2) センサ試作プロセス

筆者らは今までに BST 強誘電体薄膜を用いた赤外線センサアレイ (現時点で最大 16×16) とセンサ出力読み出し用 MOSFET を同一チップ上に作製している。強誘電体薄膜による MOSFET 作製プロセスラインの汚染を防ぐため、MOSFET を作製し、その後センサ部を作製し

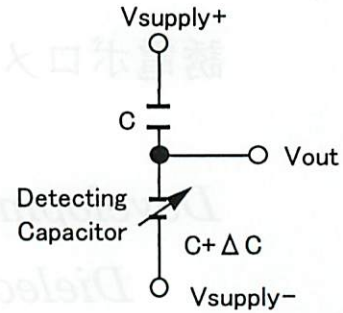


図 1 赤外線センサの単素子回路図
Schematic drawing of an infrared sensor

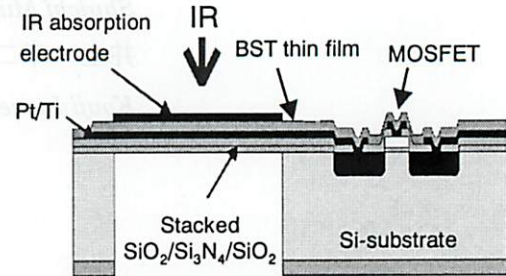


図 2 赤外線検知部と信号読み出し用 FET の断面図
Cross sectional view of an infrared sensor

た。試作プロセスは次の順序で行う。

(a) 信号処理回路の作製

Si 基板上に、熱酸化膜、CVD 法による窒化シリコン膜、酸化膜 ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) を成膜した後、画素走査用スイッチング FET とソースフォロワ用 FET をセンサ部と同一基板上に作製する。一般に集積回路を作製する際、 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ を成膜することはないが、後述するように赤外線検知部を熱絶縁構造とするために必要となる。

(b) 異方性エッチング

赤外線検知用キャパシタ部を熱絶縁構造にするため、Si 基板の裏面から TMAH (水酸化テトラメチルアンモニウム) 水溶液で異方性エッチングを施す。ただし、この後のプロセス上のハンドリングを考慮して、赤外線検知用キャパシタ下部の Si 層の厚みを $50 \mu\text{m}$ 程度残しておく。

(c) センサ形成

RF マグネトロンスパッタリング法により Pt/Ti を成膜し、リフトオフ法により下部電極・配線を形成する。次にセンサ材料である強誘電体薄膜を成膜・パターニングし、その後、下部電極と同様に Pt/Ti を成膜しリフトオフ法により、上部電極・配線を形成する。

(d) RIE エッチング

赤外線検知用キャパシタ下部において異方性エッチ

ングで残しておいた Si 層を RIE エッチングにより除去する。したがって、図 2 に示すように赤外線検知用キャパシタは $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ の厚み $1 \mu\text{m}$ の多層構造上にあり、膜全体としてストレスが最も小さくなるように形成する。一方、参照用キャパシタは Si バルク上にあるため、赤外線検知用キャパシタは参照用キャパシタと比較して熱容量が小さく熱絶縁構造となっている。

3. センサ材料の開発

上述したように、誘電ポロメータ型赤外線センサでは赤外線検知用キャパシタが赤外線を受光した際のわずかな温度上昇に起因する電気容量の変化量を参照用キャパシタの電気容量と比較して電気信号として出力する。したがって、感度向上のためセンサ材料には高い誘電率温度係数 (Temperature Coefficient of Dielectric constant: TCD) が求められる。

我々はセンサ材料としてキュリー点が室温付近にあり、誘電率の温度依存性が大きいことが期待できる BST 強誘電体薄膜に注目しセンサの試作・評価を行っている⁹⁾。BST 薄膜の成膜法として当初レーザーアブレーション法を採用した¹⁰⁾。レーザーアブレーション法は化学量論組成のコントロールが容易、成膜温度の低減化可能などの長所を有している一方、成膜面積が小さいことや均一性に問題があった。そこで、赤外線センサの多画素化に際し成膜法を Metal Organic Decomposition (MOD) 法に変更した。MOD 法は成膜の面積化にも対応可能、均一性・再現性が良好および化学量論組成のコントロールが容易などの長所を有する。MOD 法により成膜した BST 薄膜では TCD として $1.0\%/K$ (at 20°C) を得たが、人体検知レベル (約 $0.5 \text{ mW}/\text{cm}^2$) には至らず、感度不足は否めなかった。

そこで今回、より高い TCD を有する新規のセンサ材料として $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$ 強誘電体薄膜に注目した。この薄膜はペロブスカイト型構造をもち、 $0.10 < x < 0.20$ において菱面体晶系 (強誘電相) から立方晶系 (常誘電相) へ相転移するキュリー点が室温付近にあり、キュリー点近傍で TCD が大きいことが期待できる¹¹⁾。キュリー点は BTS の組成を変化させることにより調整可能であり、本研究ではキュリー点が 20°C 近傍と予想される $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.85}\text{Sn}_{0.15})\text{O}_3$ (BTS15) を成膜し、その特性を評価した。

成膜時の乾燥処理・仮焼成温度は熱重量分析と示差熱分析から決定した。示差熱分析では 97°C に吸熱ピーク、 350°C と 370°C に発熱ピークが見られ、熱重量分析では吸熱ピーク付近で 80% 以上の重量の減少が見

られた。これらの結果は 97°C で溶媒が蒸発し、 350°C 、 370°C で熱分解、結合反応が起きていることを示唆している。評価用基板は Pt/Ti/SiO₂/Si 基板とした。成膜条件の最適化を図り最終的に成膜プロセスを下記のようにした。

- ① 評価用基板の上に MOD 溶液を 1500 rpm, 20 sec でスピコート
- ② 乾燥処理 (250°C , 10 min)
- ③ 仮焼成 (450°C , 10 min)
- ④ ①~③を 5 回繰り返す毎に (5 層毎に) ミッドアニール (800°C , 10 min)
- ⑤ 20 層堆積後、本焼成 (800°C , 30 min)

当初、スピコートは大気中で行っていたが、MOD 溶液が大気中の水分により分解されるため、BTS15 薄膜表面に斑点模様ができて、さらに表面段差が 100 nm 程度もあり、センサへの応用は困難な状態であった。そこで、スピコートを N_2 雰囲気で行ったところ、均一でクラックのない BTS15 薄膜 (20 層、厚み 500 nm) が得られた。

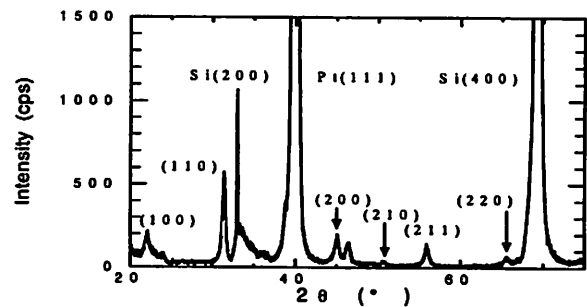


図 3 BTS15 薄膜の XRD パターン
XRD pattern of BTS15 film on Pt/Ti/SiO₂/Si.

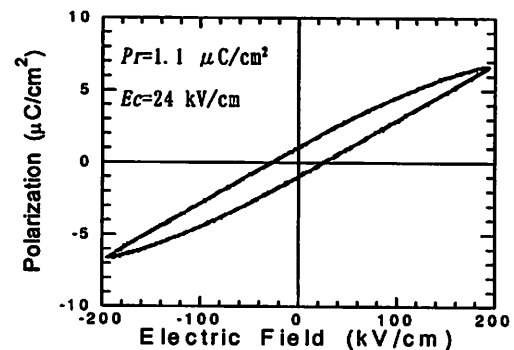


図 4 BTS15 薄膜の P-E ヒステリシス特性
P-E hysteresis loop of BTS15 film on Pt/Ti/SiO₂/Si.

図 3 に XRD パターンを示す。同図より、BaOx などのピークは見られず、鋭い BTS のペロブスカイト (110) 配向が優先的に出現していることが分かる。したがっ

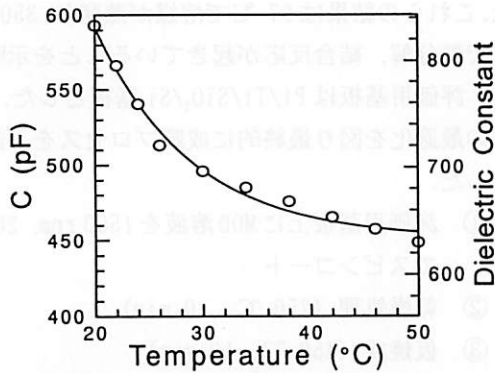


図5 BTS15 薄膜の電気容量(比誘電率)の温度依存性
Temperature dependence of capacitance (relative dielectric constant) of BTS15 film.

て、800℃の本焼成で十分にBTS15薄膜がペロブスカイト型構造に結晶化できていることが確認できた。なお、Scherrerの式¹²⁾からグレインサイズが40nm程度と算出でき、SEMによるBTS15薄膜の表面観察結果とほぼ一致した。

図4に、ソーヤ・タワー法¹³⁾により測定した分極(P)–電界(E)ヒステリシス特性を示す。若干のヒステリシスを示しており、残留分極 P_r と抗電界 E_c は、それぞれ $1.1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、 $24 \text{ kV}/\text{cm}$ と決定した。

さらに、LCRメータと恒温槽を用いてBTS15薄膜の電気容量の温度依存性を測定し、比誘電率の温度依存性、TCDを評価した。図5に、BTS15薄膜の電気容量(および、これから算出した比誘電率)の温度依存性を示す。20℃から温度が上昇するに伴い、電気容量(比誘電率)が単調減少することが分かった。強誘電体のバルクセラミックスではキュリー点近傍で誘電異常が起こり、誘電率の温度変化が大きくなることが知られているが、薄膜化した場合キュリー点を決定するのは困難な場合があり、今回も不可能であった。

図5に示した比誘電率の温度依存性からTCDを評価したところ、温度範囲20~50℃においてTCDは2.7~0.8%/Kとなった。誘電ポロメータ型赤外線センサは基本的には室温(20℃付近)使用なので、2.7%/Kという高いTCDで動作可能であり、今までのBST薄膜をセンサ材料にした誘電ポロメータ型赤外線センサよりも高い感度が期待できる。

なお、今回のBTS15薄膜のグレインサイズはXRDパターンとSEMによる表面観察結果から40nm程度と算出したが、BSTバルクセラミックスのグレインサイズが4~6 μm 程度であることから、同薄膜のグレインサイズはまだ小さく、グレインサイズ効果によりバルクセラミックスと比較して強誘電特性を示しにくいことが考えられる¹⁴⁾。したがって、グレインサイズを

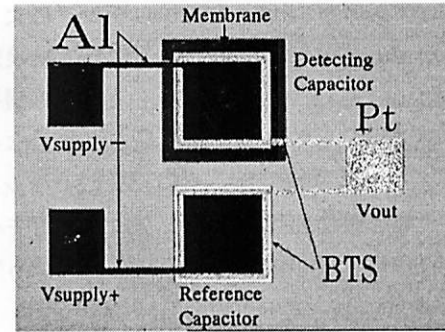


図6 BTS15 薄膜を用いた赤外線単素子センサ
Photograph of a fabricated IR detector with BTS15 film capacitor.

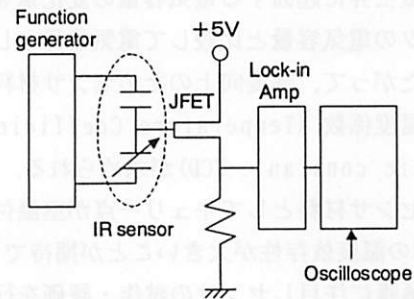


図7 赤外線センサ出力信号処理系
Experimental setup for measuring output voltage of IR sensors.

より大きくするよう成膜方法の最適化をすれば、今後さらに高いTCDが得られると考えられる。

4. 赤外線応答特性

前述したように、今までにBST薄膜を用いて誘電ポロメータ型赤外線センサアレイの試作を行っているが、今回はより高い感度が期待できるBTS15薄膜に注目しMOD法による成膜の最適化を行い、赤外線単素子センサを試作した。本節では、試作した赤外線単素子センサの赤外線応答特性の評価方法・結果について述べる。

(1) 応答特性評価方法

BTS15薄膜を用いて試作した誘電ポロメータ型赤外線単素子センサを図6に示す。従来のBST薄膜では上部電極としてPt/Tiを用いていたが、BTS15薄膜では密着性が悪くパターニングが困難であったためRFマグネトロンスパッタリング法により成膜したAl電極を用いた。赤外線検知用キャパシタと参照用キャパシタの面積は $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ とした。

赤外線センサの赤外線応答特性評価では、赤外線源として黒体炉を用い、その温度を制御することで赤外線の入射パワーを調整した。黒体炉から22cm離して

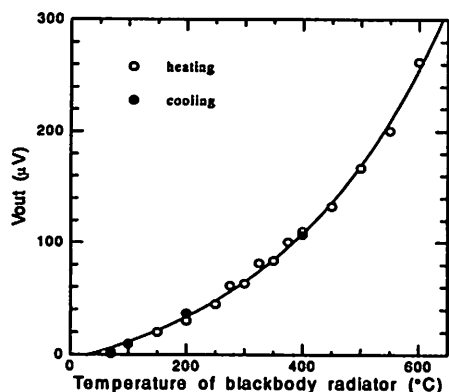


図8 BTS15 薄膜を用いた赤外線単素子センサの出力電圧の黒体炉温度依存性

Output voltage of a fabricated IR detector as a function of temperature of blackbody radiator.

Ge レンズ (bandwidth: 3~5 μm , focal length: 21 mm, aperture: f/1.2) を設置し、シールドボックス内に固定した赤外線センサに焦点を合わせた。

図7に赤外線センサ出力信号処理系を示す。ファンクションジェネレータを用いて、振幅 3 V、オフセット 1.5 V、周波数 1 kHz の位相を反転させた正弦波電圧を、赤外線検知用キャパシタと参照用キャパシタにそれぞれ印加する。理想的には両キャパシタの電気容量が等しければ赤外線未照射時に出力電圧は生じないが、実際には電気容量や抵抗成分等が微小ながらも異なり若干のオフセット出力電圧が発生するため、検知用キャパシタに印加する電圧の振幅と位相を微調整し赤外線未照射時の出力が最小になるようにする。出力電圧は JFET を使ったソースフォロワ回路により低インピーダンス化され、ロックインアンプで 1 kHz のバンドパスフィルタを介して増幅された後、オシロスコープで観測される。

オシロスコープで観測される出力波形は強誘電体薄膜の歪み等に起因すると考えられる 2 kHz の高調波が支配的であるため、オシロスコープに内蔵されている高速フーリエ変換 (FFT) 機能により 1 kHz の出力成分を抽出し数値化する。

(2) 評価結果

図8に、BTS15 薄膜を用いた誘電ポロメータ型赤外線単素子センサの出力電圧の黒体炉温度依存性を示す。同図より、黒体炉温度の昇温時と降温時の出力電圧がほぼ一致し、安定した赤外線応答特性が得られることが分かる。また、黒体炉温度が 50~60 $^{\circ}\text{C}$ の時にも出力信号が確認できることより、人体検知レベルに近づいたことが実証できた。

センサ性能評価指数である電圧感度 R_V は 150 V/W、

また測定系の雑音電圧 V_n が約 100 nV であることから比検出能 D^* は $3.5 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ とそれぞれ算出された。これらの値は焦電センサ、抵抗ポロメータ型センサで現在までに報告されている値に近づいている。

なお、試作センサの赤外線検知部の表面が Al 上部電極であり光沢をもっているため、照射された赤外線はわずかしら吸収されていない。したがって、TCD として 3 %/K 弱を示す BTS15 薄膜の本来の性能を生かしきれていないと考えられる。以上より、赤外線吸収膜の採用、さらにグレインサイズ効果を考慮した BTS 薄膜の改良により、今後のさらなる高感度化が期待できる。

5. まとめ

筆者らは誘電ポロメータ型赤外線センサに注目し、

(1) センサ材料としての高い TCD を示す強誘電体薄膜、(2) MEMS 技術を利用したセンサ構造、およびセンサ部と信号処理用 MOSFET の一体化したチップの作製プロセス、(3) 赤外線センサを多画素化する際に必要なシステムについて主に研究開発を行ってきた。

今まではセンサ材料として BST 強誘電体薄膜を採用していたが感度不足は否めなかった。今回は BTS 強誘電体薄膜という新規材料を見出し、成膜法として MOD 法を採用し最適化を行った結果、2.7 %/K (at 20 $^{\circ}\text{C}$) の高い TCD を得ることができた。同薄膜を用いた赤外線単素子センサを試作し、応答特性を調べたところ、電圧感度 R_V は 150 V/W、比検出能 D^* は $3.5 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ となり、人体検知レベルに近づいたことが確認できた。今後、赤外線吸収膜の採用、センサ材料の改良により、飛躍的な高感度化が実現できる可能性がある。

参考文献

- 1) R. Takayama, S. Fujii, A. Tomozawa, T. Deguchi and T. Hino, *Sensors and Actuators*, A21, 508 (1990)
- 2) I. H. Choi and K. D. Wise, *IEEE Trans. Electron. Devices*, ED-33, 72 (1986)
- 3) A. Tanaka, S. Matsumoto, N. Tsukamoto, S. Ito, T. Endoh, A. Nakazato, Y. Kumazawa, M. Hijikawa, H. Gotoh, T. Tanaka and N. Teranishi, *Transducers'95 Eurosensors IX*, 632 (1995)
- 4) M. A. Todd, P. A. Manning, P. P. Donohue, A. G. Brown and R. Watton, *Proc. SPIE*, 4130, 128 (2000)
- 5) H. Zhu, M. Noda, T. Mukaigawa, H. Xu, K. Hashimoto

- and M. Okuyama, T. IEE Japan, 120-E, 12, 554 (2000)
- 6) M. Noda, R. Kubo, H. Tanaka, T. Mukaigawa, K. Hashimoto and M. Okuyama, *Sensors and Actuators A*, 77, 39 (1999)
 - 7) H. Xu, K. Hashimoto, T. Mukaigawa, H. Zhu, R. Kubo, T. Usuki, H. Kishihara, M. Noda, Y. Suzuki and M. Okuyama, *Proc. SPIE*, 4130, 140 (2000)
 - 8) M. Noda, K. Inoue, M. Ogura, H. Xu, S. Murakami, H. Kishihara and M. Okuyama, *Transducers'01*, 564 (2001)
 - 9) 村上修一, 宮本哲雄, 井上幸二, 野村哲男, 小倉盛生, 岸原弘之, 野田実, 奥山雅則, 電気学会 E 準部門総合研究会, MSS-01-19 (2001)
 - 10) H. Xu, H. Zhu, K. Hashimoto, T. Kiyomoto, T. Mukaigawa, R. Kubo, Y. Yoshino, M. Noda, Y. Suzuki and M. Okuyama, *Vacuum*, 59, 628 (2000)
 - 11) M. Tsukada, M. Mukaida and S. Miyazawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35, 4908 (1996)
 - 12) 例えば, H. P. Klug et al., *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials* (NEW YORK), JOHN WILEY & SONS, INC, 491 (1954)
 - 13) 例えば, 犬石嘉雄, 中島達二, 川辺和夫, 家田正之, 誘電体現象論, 154-156, 電気学会 (1998)
 - 14) K. K. Deb, *Mat. Res. Soc. Proc.*, 360, 127 (1995)