



Wybrane aspekty teoretyczne badań termoluminescencji w porcelanie elektrotechnicznej – omówienie

RAFAL SOBOTA

Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych,
al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa
e-mail: sobotarafal@gmail.com

Streszczenie

W artykule przedstawiono aspekty teoretyczne niekonwencjonalnej, a zarazem pionierskiej metody badań porcelany elektrotechnicznej w oparciu o zjawisko termoluminescencji (TL). Metoda TL pozwala określić charakter struktury defektowej materiału ceramicznego używanego do produkcji porcelanowych izolatorów elektroenergetycznych (w elektroenergetyce najczęściej stosowanymi masami ceramicznymi są C120 i C130). Duża liczba defektów w materiale porcelanowym może świadczyć o złej jakości izolatora w wyniku niejednorodności materiału, dodatkowych domieszek, zaburzeń w sieci krystalicznej itp. Występujące defekty w strukturze powodują powstanie zlokalizowanych stanów energetycznych wewnątrz przerwy wzbronionej, toteż możliwym jest opracowanie metody identyfikującej te defekty na podstawie rejestracji światła emitowanego podczas rekombinacji promienistej na defektach pełniących rolę centrów rekombinacji.

Słowa kluczowe: termoluminescencja, porcelana elektrotechniczna, izolator ceramiczny

SELECTED THEORETICAL ASPECTS OF THERMOLUMINESCENCE STUDIES OF ELECTROTECHNICAL PORCELAIN: A REVIEW

Theoretical aspects of an unconventional and pioneer method of study of electrotechnical porcelain based on the thermo luminescence phenomenon (TL) are depicted in the paper. The TL method gives opportunity to determine a defect structure character of ceramic material applied for production of porcelain electroenergetic insulators; C120 and C130 masses are most frequently used in electroenergetics. A large number of defects in the porcelain material can testify to the bad quality of an insulator as a result of material non-uniformity, additives presence, crystalline lattice disturbance etc. The structural defects cause the appearance of localised energetic states inside the forbidden gap, therefore it is possible to develop a method of identification of those defects basing on recording a light emitted during radiant recombination on the defects that perform a role of recombination centres.

Keywords: Thermoluminescence, Electrotechnical porcelain, Ceramic insulator

1. Wstęp

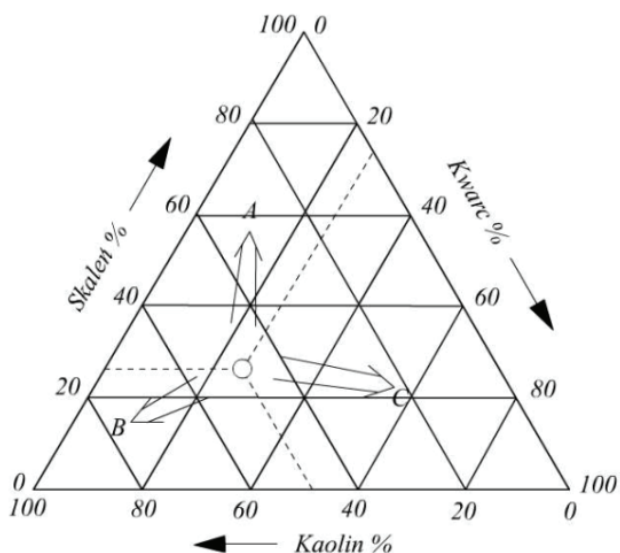
Prowadzenie badań naukowych zwykle obejmuje szerszy zakres prac niż tylko kontrola eksploatacyjna oraz badania techniczne. Otrzymane z nich wyniki własności fizycznych materiału często umożliwiają wgląd w jego wewnętrzną strukturę, a także istotę zjawisk w nim zachodzących. Wyniki tych badań w dalszej części mogą być podstawą do formułowania hipotez naukowych i uogólnień.

Poniższy referat ma na celu zaprezentowanie możliwości wykorzystania zjawiska termoluminescencji (TL) w badaniach tworzyw ceramicznych (w tym przypadku porcelany elektrotechnicznej, stosowanej do produkcji izolatorów elektroenergetycznych), jak również wybranych aspektów teoretycznych zagadnień związanych z poszczególnymi dziedzinami składającymi się na opisywaną technikę pomiarów, tj. materiałoznawstwo, fizyka, elektrotechnika, chemia.

2. Charakterystyka porcelany elektrotechnicznej

Porcelana elektrotechniczna zawiera zwykle 50% kaolinu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 25% kwarcu (SiO_2) w postaci białego piasku kwarcowego i 25% skalenia ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$). Zwiększenie zawartości skalenia względem pozostałych składników wpływa korzystnie na własności elektryczne porcelany, natomiast zawartość kwarcu na jej właściwości mechaniczne (Rys. 1) [1].

Obecnie (od ok. 2000 roku) zakłady porcelany elektrotechnicznej do produkcji izolatorów stacyjnych wykorzystują najpopularniejszą masę ceramiczną jaką jest masa C130. Natomiast w elektroenergetyce można jeszcze spotkać te same izolatory wykonane z masy o oznaczeniu C120. Skład chemiczny omawianych mas przedstawia się tak, jak pokazano na Rys. 2.



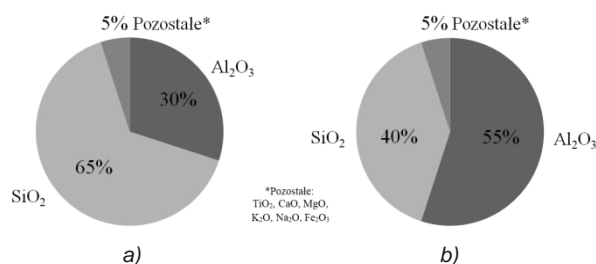
Rys. 1. Zależność własności porcelany elektrotechnicznej od zawartości składników (typowy skład oznaczono kółkiem): A – zwiększanie się wytrzymałości elektrycznej, B – zwiększanie się odporności cieplnej, C – zwiększanie się wytrzymałości mechanicznej [1].

Fig. 1. The dependence of electrotechnical porcelain properties on component content (typical composition is indicated by the circle): A – an increase in electrical strength, B – an increase in thermal resistance, C – an increase in mechanical strength [1].

Struktura porcelany elektrotechnicznej ma charakter niejednorodny, ponieważ podczas procesu produkcyjnego, jakim jest wypalanie, część substratów stapia się, tworząc wiążącą fazę szklistą, w której znajdują się wtrącenia fazy krystalicznej. Faza szklista zajmuje zwykle (5–70)% objętości materiału. Materiały porowate zawierają dodatkowo fazę gazową, przez co ich mikrostruktura bywa bardzo różnorodna [1].

Podstawowe parametry porcelany elektrotechnicznej [1, 2, 4]:

- współczynnik strat $\operatorname{tg} \delta$: $(80\text{--}120) \cdot 10^{-4}$ (przy częstotliwości $f = 10^6$ Hz), $(200\text{--}300) \cdot 10^{-4}$ (przy częstotliwości $f < 10^6$ Hz), $0,0170\text{--}0,0280$ (przy częstotliwości $f = 50$ Hz),
- rezystywność skośna ρ_s : $10^{11}\text{--}10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$,
- rezystywność powierzchniowa ρ_p : $10^{13} \Omega \cdot \text{cm/cm}$ (w warunkach suchych), $10^{10}\text{--}10^{12} \Omega \cdot \text{cm/cm}$ (przy wilgotności względnej 80%),
- wytrzymałość dielektryczna K_p : 20–30 kV/mm (dla kilku mm),
- wytrzymałość na wyładowania niezupełne: wystarczająca,
- wytrzymałość na wyładowania łukowe: średnia,
- przenikalność elektryczna ϵ : 4–5 (ceramika drobno-porowata), do kilku tysięcy (np. dla ceramiki tytanianowej),
- temperaturowy współczynnik przenikalności elektrycznej α_ϵ : $(550\text{--}600) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,
- temperaturowy współczynnik rozszerzalności liniowej α_L : $(1,1\text{--}10) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,
- temperatura zmian właściwości elektrycznych t_{ei} : $> 100^\circ \text{C}$,
- temperatura mięknięcia t_m : $> 600^\circ \text{C}$,
- temperatura odkształceń t_{od} : $> 1000^\circ \text{C}$,
- skurcz objętościowy podczas wypalania: do 20%,
- ciepło molowe c_m : $0,4\text{--}1,25 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$,



Rys. 2. Skład chemiczny masy: a) C120 [2], b) C130 [3].
Fig. 2. Chemical composition of mass: a) C120, b) C130 [3].

- ciepło właściwe c_w : $0,80\text{--}0,90 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$,
- przewodność cieplna γ_c : $1,1\text{--}1,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- wytrzymałość na rozciąganie R_r : $(0,8\text{--}20) \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$,
- wytrzymałości na ściskanie R_s : $2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$,
- wytrzymałość na zginanie R_g : $(0,3\text{--}2,2) \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$,
- udarność R_u : $(1,3\text{--}5,9) \cdot 10^3 \text{ Nm/m}^2$,
- twardość Mohsa H_M : 6–9,
- współczynnik sprężystości wzdłużnej E : $(5\text{--}37) \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$,
- trwałość: nieograniczona,
- ogniotrwałość: wysoka,
- gęstość: $2,25\text{--}2,50 \text{ g/cm}^3$,
- barwa: biała.

Powlekanie porcelany elektrotechnicznej szkliwem ochronnym znacznie polepsza jej właściwości mechaniczne. Pokrywanie glazurą powierzchni porowatych materiałów izolacyjnych zabezpiecza izolatory porcelanowe przed zabrudzeniem, które w bardzo łatwy sposób można usunąć z gładkich powierzchni. Ponadto emalia chroni izolator przed powierzchniowym pochłanianiem wilgoci z otoczenia, w którym jest eksploatowany [2].

3. Dozymetria izolatorów ceramicznych

Na uwagę zasługuje fakt, że pierwsze badanie łączące wykorzystanie zjawiska TL z izolatorem porcelanowym zostało przeprowadzone przez rosyjskich naukowców z Instytutu Higieny Radiacyjnej z Petersburga. W pomiarach tych określano dawkę promieniowania jonizującego pochłoniętego przez porcelanę elektrotechniczną.

W dniu 25 sierpnia 1978 roku w Związku Radzieckim przeprowadzono eksperymentalną, kontrolowaną podziemną eksplozję jądrową zwaną „Kraton-3”. Specjalnie zaprojektowana bomba plutonowa została zdetonowana pod powierzchnią ziemi na głębokości 577 m w obszarze wiecznej zmarzliny. Moc energetyczna ładunku wynosiła ok. 22 kilotony, co jest porównywalne z siłą wybuchu bomby zdetonowanej przez amerykańskie wojsko w Nagasaki w 1945 r. Do przeprowadzenia eksperymentu „Kraton-3” zatrudniono około 80 cywilnych i wojskowych pracowników. Z uwagi na szereg niedoskonałości technologicznych podczas prowadzonego projektu, radioaktywność o nieznanym wielkości została uwolniona do atmosfery przez powstałe otwory w ziemi. W tym czasie warunki pogodowe były nieprzyjające, a dziewięć minut po eksplozji chmura promieniotwórcza przesunęła się o 2,5 km na północny-wschód od miejsca detonacji. Pomimo natychmiastowej ewakuacji zarówno okoliczni mieszkańcy, jak i pracownicy eksperymentu byli narażeni na promieniowanie, które według oficjalnych

doniesień osiągnęły wartość 0,09–0,3 Sv (przy czym 1 Sv to dawka śmiertelna) [5, 6].

W latach 2001–2002 pracownicy Instytutu Higieny Radiacyjnej otrzymali kilka izolatorów porcelanowych z terenu „Kraton-3”. Głównym celem badań, wykorzystujących metodę termoluminescencji, było określenie łącznej dawki promieniowania jonizującego zaabsorbowanej w izolatorach [6]. Wyniki tych pomiarów umożliwiły wyznaczenie dodatkowych danych, takich jak dawka promieniowania gamma pochłoniętego przez personel podczas przeprowadzanego eksperymentu. Otrzymana wartość była również pomocna przy ocenie wpływu eksplozji na środowisko naturalne. Dawka D_M pochłonięta przez człowieka wyznaczona została na podstawie:

$$D_M = D_T - D_N \quad (1)$$

gdzie: D_T – całkowita dawka TL [Gy], D_N – dawka pochodząca ze źródeł naturalnych [Gy].

W zależności od użytej techniki TL minimalna wykrywalna dawka promieniowania pochłoniętego przez różne materiały wynosi 0,01–0,5 Gy. W przypadku badanego materiału ceramicznego z miejsca „Kraton-3” wyniosła 1,2–10 Gy [5].

Podobne badania przeprowadzono dla izolatorów porcelanowych pozyskanych z miejsca katastrofy elektrowni jądrowej w Czarnobylu.

4. TL jako narzędzie do datowania

Istnieją obszary, w których zjawisko TL wykorzystuje się do określania wieku materiałów, zwane datowaniem luminescencyjnym. Jednym z nich jest archeologia, w której ważną kwestią jest poznanie czasu wytworzenia pradawnej ceramiki odkrytej w wykopaliskach. Do drugiego zaliczyć można geologię, w której datowane są skały i struktury geologiczne. W obu tych przypadkach pomiary opierają się na minerałach wykazujących zjawisko TL, na powszechności promieniowania jonizującego w otoczeniu, a także na fakcie wyzerowania dawki pochłoniętej przez badany materiał w wyniku konkretnego zdarzenia. Najczęściej takim zdarzeniem jest wysoka temperatura lub ekspozycja na światło słoneczne, a następnie na stopniowym absorbowaniu dawki w materiale pod wpływem promieniowania naturalnego (kosmicznego i ziemskiego) [7].

W przypadku materiałów ceramicznych w momencie ich wypalania nastąpiło opróżnienie wszystkich pułapek elektronowych, które zostały uprzednio wypełnione w wyniku naturalnego promieniowania [8]. Od tego momentu znajdujące się w próbce oraz jej otoczeniu radionuklidy rozpoczęły od nowa proces wypełniania pułapek elektronowych. Wynik TL związany jest ściśle z tymi czynnikami i zależy od właściwości materiału S , średniej mocy dawki w miejscu przebywania materiału D oraz czasu ekspozycji t [9]:

$$TL_N = S \cdot t \cdot D \quad (2)$$

gdzie S – termoluminescencyjna czułość materiału (głównie SiO_2) na jednostkę pochłoniętej dawki.

Po przekształceniu równania (2) możliwe jest więc wyznaczenie wieku t badanej próbki. Pochłonięta dawka przez archeologiczną ceramikę pochodzi od trzech rodzajów pro-

mieniowania α , β , i γ . Obliczenie wieku próbki na podstawie równania (2) jest proste pod warunkiem, że znana jest moc dawki od poszczególnych składowych promieniowania. Informację tę uzyskuje się poprzez analizę zawartości poszczególnych radionuklidów w ceramice oraz otaczającej ją glebie. [9]

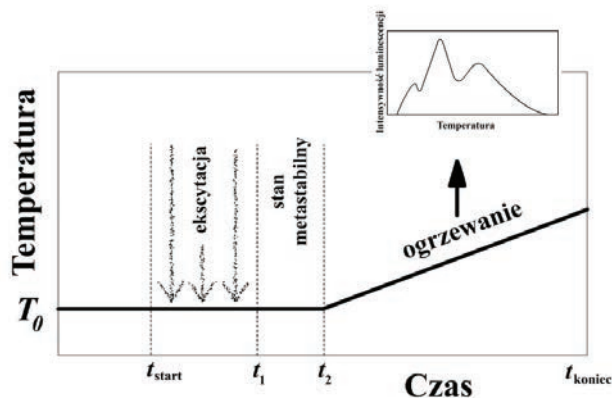
Datowanie TL w geologii wykorzystywane jest do określenia wieku skał wulkanicznych, osadów wapniowych oraz lessowych. Dla skał wulkanicznych proces wypełniania pułapek elektronowych rozpoczął się po zastygnięciu lawy. W przypadku skał osadowych od chwili ich skryształizowania. Natomiast dla osadów lessowych wypełnianie rozpoczęło się w momencie, gdy w wyniku wieloletniego działania promieni słonecznych zostały one „wybielone” optycznie i przykryte kolejnymi warstwami osadów [7].

Metoda TL jest także jednym ze sposobów określania wieku służącym do potwierdzenia lub zakwestionowania wyników innych metod.

5. Mechanizm termoluminescencji

Zjawisko termoluminescencji TL zachodzi wtedy, gdy badany materiał emituje światło pod wpływem wzrostu temperatury, o ile emisja ta przewyższa jego promieniowanie termiczne (promieniowanie tła).

Termoluminescencja możliwa jest do zaobserwowania w różnych dielektrykach lub półprzewodnikach z dużą przerwą energetyczną – organicznych oraz nieorganicznych. Nie występuje w przewodnikach elektrycznych. Zjawisko TL ma charakter dwuetapowy (Rys. 3). Początkowo badana próbka poddawana jest procesowi ekscytacji ($t_{start} - t_1$), najczęściej poprzez wysokoenergetyczne promieniowanie jonizujące. Po tym etapie materiał przechodzi w stan metastabilny ($t_1 - t_2$). W celu wywołania zjawiska luminescencji ($t_2 - t_{koniec}$) używa się stymulatora w postaci zmiany temperatury (ogrzewanie). W odpowiednio wysokiej temperaturze wszystkie ciała stałe emitują światło, przy czym jest to promieniowanie tła (termiczne). Jednak w termoluminescencji emisja światła (jarzenie, żarzenie) znacznie przewyższa wartość promieniowania termicznego. Ponadto zjawisko TL nie wystąpi, gdy nie ma etapu ekscytacji.



Rys. 3. Mechanizm termoluminescencji z przykładową krzywą jarzenia [10].

Fig. 3. Mechanism of thermoluminescence with a sample of glow curve [10].

Zjawisko termoluminescencji możliwe jest do wytłumaczenia w oparciu o istnienie pułapek nośników ładunku w badanym materiale. Pułapki te są bezpośrednio związane z defektami struktury krystalicznej badanego materiału (domieszki, dyslokacje itp.) [11]. Pojęcie pułapki określane jest w postaci zlokalizowanego (przestrzennie i energetycznie) poziomu energetycznego w przerwie wzbronionej izolatora. W zależności od jej położenia względem poziomu Fermiego pułapka może wychwytywać elektrony lub dziury. Podczas procesu ekscytacji generowane są przejścia pasmo-pasmo, a część pułapek zapełnia się nośnikami ładunku. W stanie metastabilnym badany materiał może pozostawać, praktycznie niezmienny, przez bardzo długi okres czasu (często liczony w latach). Dopiero zmiana temperatury (proces stymulacji termicznej) uwalnia uwięzione w pułapkach nośniki ładunku, które następnie rekombinują z uwięzonymi nośnikami przeciwnego znaku. Ten drugi rodzaj pułapek określany jest mianem centrów rekombinacji. Zwykle taka rekombinacja bywa promienista, a więc możliwa jest obserwacja światła luminescencji. [12]

W przypadku aktywnych elektronów, proces rekombinacji (Rys. 4) zaczyna się w chwili, gdy elektron znajdujący się w pułapce otrzyma energię wyższą od energii wiązania. Wtedy następuje etap wybicia D nośnika ładunku do pasma przewodnictwa. W paśmie tym transportowany jest w pobliżu dziury (do centrum luminescencji), z którą rekombinuje B , emitując traconą energię w postaci kwantu światła luminescencji.

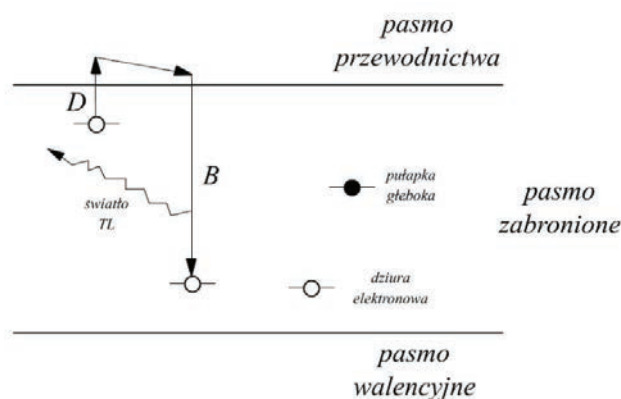
Prawdopodobieństwo termicznego wybicia uwięzionego w pułapce elektronu do pasma przewodnictwa zależy od ilości energii dostarczonej w postaci zmiany temperatury (drgań termicznych) i ściśle określone jest przez czynnik Boltzmanna. Liczba elektronów wybitych do pasma przewodnictwa w jednostce czasu w temperaturze T , w przypadku braku powtórnego wychwytu elektronów do pułapki (tzw. *retrapping*), określana jest z zależności:

$$\frac{dn}{dt} = ns \cdot \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \quad (3)$$

gdzie: n – koncentracja elektronów w aktywnych pułapkach [m^{-3}], s – współczynnik częstościowy związany z rodzajem defektu (o wartości rzędu 10^6 – 10^{14} s^{-1}), E – energia wiązania pułapki [eV], k – stała Boltzmanna [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$], T – temperatura [K].

Z równania (3) wynika, że w wyniku zmiany temperatury T zwiększa się wykładniczo liczba uwalnianych elektronów, a tym samym ilość światła luminescencji tak długo, aż nie zacznie maleć wyraźnie n , czyli liczba pułapek zapełnionych w pierwszym etapie. Po osiągnięciu tego etapu oraz wyraźnym opróżnieniu elektronów z płytkich pułapek podczas dalszego wzrostu temperatury dosyć szybko spada liczba uwalnianych elektronów. Wraz z nią zmniejsza się natężenie światła spowodowane faktem, iż głębsze pułapki nie są jeszcze w znaczącym stopniu opróżnione. Podnosząc liniowo temperaturę badanego materiału oraz rejestrując ilość emitowanego światła luminescencji uzyskuje się wykres zwany krzywą termoluminescencji lub krzywą jarzenia [14].

Charakterystyka krzywych TL pozwala na uzyskanie wielu informacji dotyczących struktury energetycznej i kon-



Rys. 4. Model zmian w konfiguracji elektronów oraz dziur w dielektryku prowadzący do powstania zjawiska TL w wyniku rekombinacji pod wpływem temperatury [13].

Fig. 4. Model of changes in the electron/hole configuration in a dielectric, leading to TL due to recombination stimulated by heat [13].

centracji różnych defektów występujących w badanym materiale. W szczególności można wyznaczyć energie aktywacji pułapek, czynniki częstościowe itp. [13]. Krzywe TL zwykle poddawane są analizie matematycznej w oparciu o metodę dekonwolucji, która polega na numerycznym dopasowaniu i rozkładzie na piki elementarne złożonej krzywej TL.

6. Podsumowanie

Możliwości zastosowań technik opartych na występowaniu i badaniu zjawiska termoluminescencji jest wiele. W referacie przytoczono tylko wybrane, najważniejsze z nich. Ponadto omówiono tworzywo jakim jest porcelana elektrotechniczna.

Za pomocą metody TL możliwe jest określenie charakteru struktury defektowej porcelany elektrotechnicznej (używanej do produkcji ceramicznych izolatorów elektroenergetycznych), będącej w ścisłej korelacji z właściwościami elektrycznymi materiałów izolacyjnych stosowanych w elektrotechnice.

Metody pomiarowe TL nie ograniczają się tylko do tworzyw ceramicznych, ale z powodzeniem mogą być stosowane w badaniach innych materiałów dielektrycznych oraz półprzewodnikowych.

Liczba defektów w badanym tworzywie związana jest z niejednorodnością materiału, dodatkowymi domieszkami, dyslokacjami, zaburzeniami w sieci krystalicznej itd., które przekładają się na jego właściwości oraz jakość [12].

W związku z tym możliwe jest stosowanie metody wykorzystującej zjawisko TL w celu identyfikacji defektów w budowie sieci krystalicznej ciał stałych.

Podziękowania

Badania termoluminescencyjne izolatorów porcelanowych prowadzono w ramach projektu badawczego nr NCN/2012/07/B/ST8/03890 pt.: „Optyczna charakterystyka struktury defektowej izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich i wysokich napięć”.

Literatura

- [1] Celiński, Z.: *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, (2011).
- [2] Pohl, Z.: *Izolatory Elektroenergetyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, (1995).
- [3] ZAPEL S.A.: *Materiały konferencyjne i protokoły badawcze Zakładu Porcelany Elektrotechnicznej*, Boguchwała, (2012).
- [4] Antoniewicz, J.: *Własności dielektryków: Tablice i wykresy*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, (1971).
- [5] Ramzaev, V., Goksu, Y.: Cumulative dose assessment using thermoluminescence properties of porcelain isolators as evidence of a severe radiation accident in the Republic of Sakha (Yakutia), Russia, 1978, *Health Phys.*, 91, 3, (2006), 263–269.
- [6] Ramzaev, V., Mishin, A., Golikov, V., Argunova, T., Ushnitski, V., Zhuravskaya, A., Sobakin, P., Brown, J., Strand, P.: Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978 – 2007, *J. Environ. Radioactiv.*, 100, 12, (2009), 1092–1099.
- [7] Liritzis, I.: Surface dating by luminescence: An overview, *Geochronometria*, 38, 3, (2011), 292–302.
- [8] Sobota, R.: Thermoluminescence Phenomena of Electrical Porcelain, Thomson-Reuters CPCI-S i SCOPUS, *The 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering – Stará Lesná*, Slovakia, (2015).
- [9] Wang, W. D.: Study and progress of the thermoluminescence dating of the ancient pottery and porcelain, *Sci. China Ser. E Techn. Sci.*, 52, 6, (2009), 1613–1640.
- [10] Mandowski, A., Orzechowski, J., Mandowska, E.: Kinetics of excitation in TL and OSL detectors, *Optical Mater.*, 32, 12, (2010), 1568–1572.
- [11] Mandowski, A.: How to detect trap cluster systems?, *Rad. Meas.*, 43, 2–6, (2008), 167–170.
- [12] Sobota, R., Mandowski, A., Mandowska, E.: Luminescencja izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich napięć, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, 53, 11, (2012), 109–111.
- [13] Mandowski, A.: On the verification of the simple trap model by simultaneous TL/TSC measurements, *Physica B: Condens. Matter*, 358, 1–4, (2005), 166–173.
- [14] Niewiadomski, T.: *Dozymetria termoluminescencyjna w praktyce*, Instytut Fizyki Jądrowej, Raport nr 1550/D, Wyd. 1, Kraków, (1991).



Otrzymano 30 czerwca 2017, zaakceptowano 25 lipca 2017.