

Struktura pułapkowa izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich napięć

Streszczenie. O własnościach elektrycznych izolatora w znacznym stopniu decyduje struktura energetyczna defektów sieci krystalicznej. Defekty sieci powodują powstanie zlokalizowanych poziomów elektronowych wewnątrz przerwy energetycznej izolatora. W zależności od wartości energii aktywacji poziomy te mogą pełnić rolę pułapek nośników ładunku lub centrów rekombinacji. Strukturę pułapkową izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich napięć badano przy użyciu termoluminescencji. W zakresie temperatur 300 – 600 K widmo termoluminescencji pokazuje obecność co najmniej kilku pułapek i centrów rekombinacji, których parametry zależą od rodzaju badanego izolatora.

Abstract. Electrical properties of an insulator are largely determined by the energy structure of the crystal lattice defects. Lattice defects give rise to localized electronic levels inside the energy gap of the insulator. These energy levels may act as charge carrier traps or recombination centers depending on the value of the activation energy. The trap structure of the ceramic insulators of medium voltage power networks were studied using thermoluminescence. In the temperature range of 300 – 600 K thermoluminescence glow curve shows the presence of at least a few traps and recombination centers, whose parameters depend on the type of insulator under study. (**Trap structure of ceramic insulators of middle voltage power networks**).

Słowa kluczowe: luminescencja, termoluminescencja (TL), sieci energetyczne, izolator ceramiczny, pułapki, centra rekombinacji.

Keywords: luminescence, thermoluminescence (TL), power networks, ceramic insulator, traps, recombination centers.

Wstęp

Izolatory ceramiczne są powszechnie stosowane w krajowej sieci energetycznej [1-3]. Bardzo istotną cechą każdego izolatora, w znacznym stopniu determinującą jego własności elektryczne i przebiciowe, jest struktura energetyczna defektów. Każda niejednorodność zaburza strukturę pasmową izolatora powodując powstanie zlokalizowanych poziomów energetycznych wewnątrz przerwy wzbronionej. Takie poziomy nazywamy pułapkami nośników ładunku, ponieważ posiadają możliwość wychwytu swobodnych elektronów i dziur i przetrzymywania ich przez długi czas – nawet wielu tysięcy lat. Niektóre pułapki pełnią funkcję centrów rekombinacyjnych dla nośników większościowych. Rekombinacja pomiędzy dziurą a elektronem przyjmuje zwykle formę promienistą, a więc jest połączona z emisją fotonu, czyli luminescencją [4].

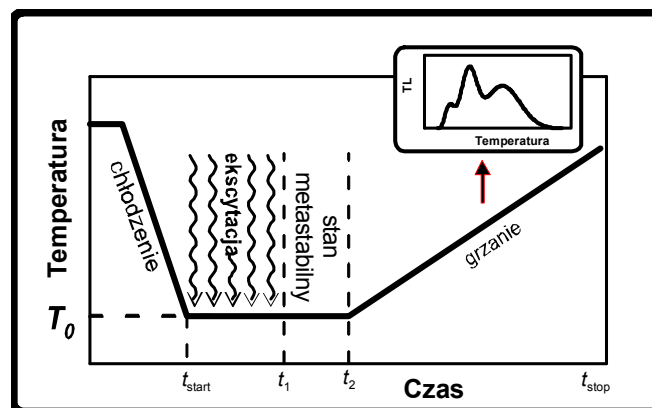
Duża liczba defektów może świadczyć o złej jakości izolatora [5]. Ponieważ defekty powodują powstanie zlokalizowanych stanów energetycznych wewnątrz przerwy wzbronionej, wydaje się możliwe opracowanie metody identyfikującej te defekty na podstawie rejestracji światła emitowanego podczas rekombinacji promienistej na defektach pełniących rolę centrów rekombinacji. Celem niniejszych badań jest zdobycie wiedzy na temat defektów strukturalnych izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich napięć przy wykorzystaniu metody termoluminescencji (TL).

Metoda pomiaru

Ogólny przebieg pomiaru TL przedstawiony jest na rysunku 1. Początkowo badany materiał jest schładzany do odpowiednio niskiej temperatury T_0 , w której następuje ekscytacja wysokoenergetycznym promieniowaniem powodującym przejścia pasmo - pasmo wewnątrz dielektryka. W stanie metastabilnym izolator może pozostawać bardzo długo. Potem następuje właściwy pomiar termoluminescencji podczas ogrzewania próbki. Ogrzewanie jest zazwyczaj liniowe, a więc ma postać: $T(t) = T_0 + \beta t$, gdzie β jest szybkością grzania w K/s.

W pomiarach TL ekscytacji dokonywano w temperaturze pokojowej, a więc chłodzenie próbek nie było konieczne. Kawałki izolatora ceramicznego o rozmiarze 6-8 mm, odłupane z różnych jego części (rdzeń, kołpak, szkliwo), były wstępnie napromieniowane źródłem promieniowania

beta $^{90}\text{Sr}^{90}\text{Y}$. Bezpośrednio po napromieniowaniu próbka była montowana na stoliku grzewczym komory optycznej. W celu uniknięcia niepożądanego deekscytacji materiału, czynności te, jak również samo przygotowanie próbki, wykonywano w ciemności, używając jedynie słabego czerwonego światła. Pomiaru TL dokonywano podczas liniowego ogrzewania próbki z szybkością $\beta = 0,7$ K/s w zakresie temperatur 300 – 600 K. Rolę detektora pełnił fotopowielacz bialkaliczny firmy Hamamatsu działający w trybie zliczania fotonów (*photon counting*). W wysokich temperaturach (powyżej 450 K) pomiar TL może być silnie zaburzony przez naturalne promieniowanie termiczne. Dlatego, po zakończeniu właściwego pomiaru dokonywane pomiaru tła, które w dalszym etapie odejmowano od zmierzonej krzywej TL.



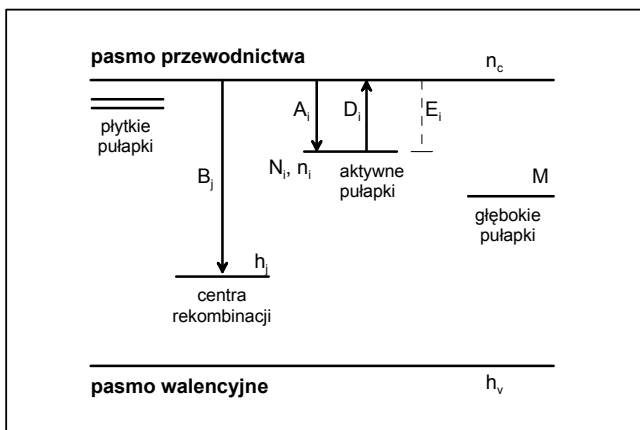
Rys. 1. Typowy przebieg pomiaru termoluminescencji

Pomiary spektralnie rozdzielczej TL [6] dokonywano w innej konfiguracji. Światło luminescencji było zbierane przez światłowód do monochromatora M266 (*Solar Laser Systems*) skanującego widma w zakresie 250 – 600 nm, a następnie do fotopowielacza bialkalicznego. Cała aparatura jest sterowana komputerowo.

Teoria

Jednym z najczęściej stosowanych modeli opisujących zjawisko termoluminescencji jest tzw. prosty model pułapkowy (STM – *the simple trap model*) [4, 7]. Schemat

energetyczny STM pokazany jest na rysunku 2. W przerwie energetycznej izolatora, pomiędzy pasmem walencyjnym a pasmem przewodnictwa, istnieją zlokalizowane poziomy metatrwałe – pułapki i centra rekombinacji, związane zwykle z defektami strukturalnymi materiału. Początkowy proces wzbudzenia (ekscytacji) generuje przejścia pasmo-pasmo, a więc pary dziura-elektron. Bepośrednio po wzbudzeniu dziury i elektrony rekombinują ze sobą, jednak pewna część dostaje się do głębszych pułapek, gdzie zostają uwięzione. Głębsze poziomy pułapkowe są metatrwałe, więc nośniki ładunku mogą tam przebywać bardzo długi czas, jeśli tylko próbka znajduje się w temperaturze początkowej T_0 znacząco niższej niż zakres, w którym zachodzi termoluminescencja. W prezentowanym modelu przyjmujemy, że nośnikami aktywnymi, czyli uwalnianymi w trakcie ogrzewania, są elektrony, które rekombinują z dziurami zlokalizowanymi w centrach rekombinacji.



Rys. 2. Schemat poziomów energetycznych pułapek nośników ładunku i centrów rekombinacji w modelu STM (*the simple trap model*)

W trakcie ogrzewania prawdopodobieństwo termicznego uwolnienia elektronów z pułapek wzrasta. Część uwolnionych elektronów rekombinuje z dziurami w centrach rekombinacji generując fotony, które mogą być mierzone np. za pomocą fotopowielacza. Zjawisko TL reprezentujemy zwykle w postaci krzywej natężenia promieniowania optycznego w funkcji czasu lub temperatury. Taką zależność nazywamy często krzywą jarzenia (*glow curve*). Zakładając uproszczony przypadek, w którym mamy do czynienia tylko z jednym poziomem pułapek elektronowych i centrów rekombinacji, równania STM przyjmują następującą postać:

$$(1a) \frac{dn}{dt} = -D(t)n + An_c(N - n)$$

$$(1b) \frac{dn_c}{dt} = D(t)n - An_c(N - n) - Bn_c m$$

$$(1c) \frac{dm}{dt} = -Bn_c m$$

gdzie: N – koncentracja stanów pułapkowych, n – koncentracja elektronów w pułapkach, m – koncentracja dziur w centrach rekombinacji, A – współczynnik gęstości prawdopodobieństwa wychwycenia elektronu do pułapki, B – współczynnik gęstości prawdopodobieństwa rekombinacji promienistej, n_c – koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa. Wielkość $D(t)$ określa prawdopodobieństwo wzbudzenia nośnika do pasma przewodnictwa w danej temperaturze T , i jest zdefiniowana jest następująco:

$$(2) D(t) = \nu \exp\left(\frac{-E}{kT(t)}\right)$$

gdzie: ν – czynnik częstościowy, k – stała Boltzmanna, E – energia aktywacji, oraz $T(t)$ – funkcja zależności temperatury od czasu (zazwyczaj liniowa). Rozwiązanie powyższego układu równań różniczkowych pozwala na znalezienie wartości natężenia promieniowania optycznego (luminescencji) w chwili t z zależności:

$$(3) L(t) = Bmn_c$$

Powyższy układ równań jest układem nieliniowym i nie posiada prostych rozwiązań analitycznych. Można jednak wykazać, że z pomocą kilku założeń upraszczających, do których należy założenie o stosowności przybliżenia kwazi-równowagi, niewielkim wpływie powtórnego pułapkowania (*retrapping*) lub/i dużej koncentracji głębokich (tzw. „termicznie rozłącznych”) pułapek M , otrzymujemy tzw. rozwiązanie Randalla-Wilkinsa. W przypadku wielu aktywnych poziomów pułapkowych równanie to ma postać [4]:

$$(4) L(T) = \sum_{i=1}^p J_{0i} \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \exp\left[-\frac{V_i}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E}{kT'}\right) dT'\right]$$

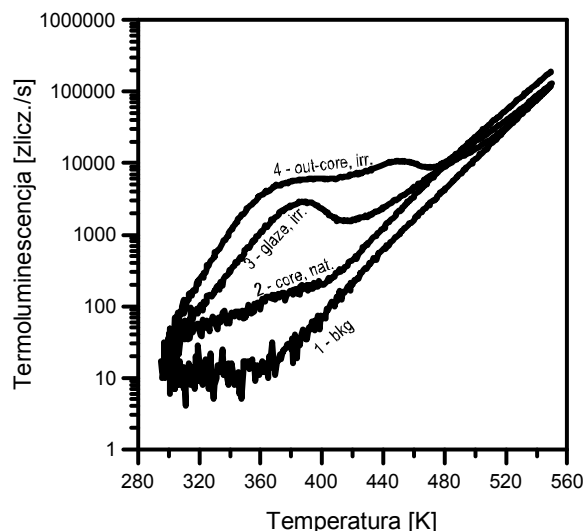
Każdemu poziomowi pułapkowemu odpowiada zatem lekko asymetryczny pik parametryzowany przez trzy niewiadome $\{J_{0i}, v_i, E_i\}$. Parametry te można uzyskać z krzywej jarzenia TL poprzez dopasowanie numeryczne funkcji (4). Warto też zauważyć, że w obszarze początkowego narastania piku wartość całki w równaniu (4) jest praktycznie równa zero. Mamy zatem (dla jednego piku):

$$(5) L(T) \approx J_{0i} \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right)$$

Na wykresie Arrheniusa $\ln(L) \times (1/kT)$ otrzymamy zatem linię prostą o nachyleniu $(-E)$.

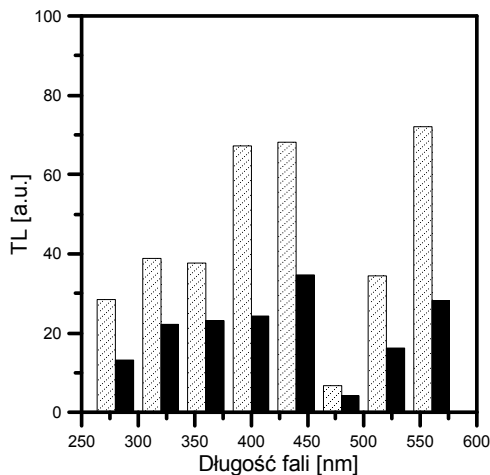
Wyniki

Przykładowe wyniki pomiaru termoluminescencji izolatora ceramicznego z 1960 roku pokazane są na rysunku 3.

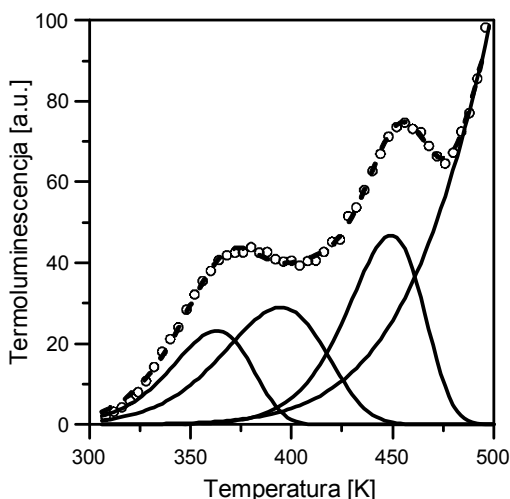


Rys. 3. Termoluminescencja izolatora ceramicznego z 1960 roku pracującego w sieci średnich napięć. Krzywa 1 przedstawia naturalne tło termiczne. Inne krzywe obrazują pomiary wykonane dla próbek pochodzących z różnych części izolatora: 2 – rdzeń izolatora bez ekscytacji; 3 – szkliwo izolatora, ekscytacja promieniowaniem β ; 4 – zewnętrzna część rdzenia izolatora, ekscytacja promieniowaniem β

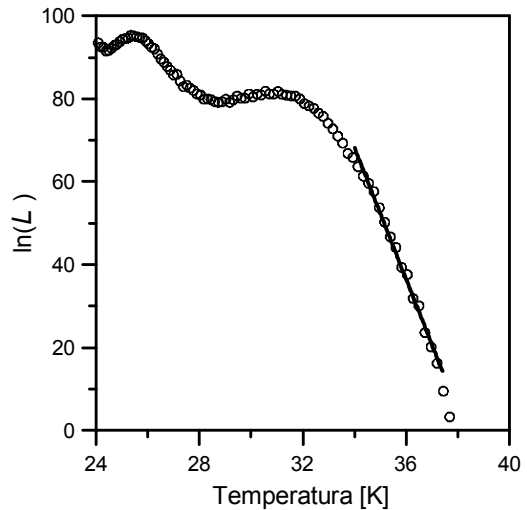
Krzywa 2 pokazuje naturalną termoluminescencję rdzenia izolatora. Słowo „naturalny” odnosi się do braku początkowej ekscytacji izolatora. Krzywa ta ma bardzo małą intensywność. Obecność TL w próbce nienapromieniowanej należy tłumaczyć występowaniem naturalnego promieniowania tła. Materiał ceramiczny „zapamiętuje” dawkę pochłoniętego promieniowania od momentu wytworzenia. Moment produkcji możemy utożsamiać z chwilą „zerowania” sygnału TL z uwagi na bardzo wysoką temperaturę, w której wytwarzane są izolatory. Temperatura jest tak wysoka (ok. 1300°C), że powoduje uwolnienie wszystkich nośników ładunku, nawet z głębokich pułapek. Krzywe 3 i 4 obrazują TL po napromieniowaniu izolatora promieniowaniem β dawką 260 Gy. Krzywą 3 uzyskano dla szkliwa, natomiast krzywą 4 zmierzono dla rdzenia. Świecenie rdzenia jest znacznie bardziej intensywne. W wysokich temperaturach (powyżej 400 K) istotną częścią rejestrowanego światła jest promieniowanie termiczne. Dlatego też w prawidłowym pomiarze TL konieczne jest odjęcie tego tła. Na rysunku 3 taką „krzywą odniesienia” jest krzywa 1, którą zmierzono po wykonaniu pomiaru TL i schłodzeniu próbki.



Rys. 4. Pomiar widmowe termoluminescencji scałkowane po temperaturze w zakresie 295 – 500 K (słupki zakreślone) oraz całkowane w zakresie 295 – 420 K (słupki pełne). Materiał naświetlony promieniowaniem β dawką 450 Gy



Rys. 5. Termoluminescencja rdzenia izolatora ceramicznego z 1960 roku. Linie ciągłe przedstawiają rozkład krzywej na cztery piki Randalla-Wilkinsa (4); linia przerywana – suma pików; kółka – dane pomiarowe



Rys. 6. Początek krzywej narastania sygnału TL na wykresie Arrheniusa $\ln(L) \times (1/kT)$ z dopasowaną linią prostą

Rysunek 4 przedstawia wynik pomiaru spektralnie rozdzielczej TL po scałkowaniu w szerokim zakresie temperatur. Pomiar spektralnie rozdzielczy jest bardzo trudny do wykonania ze względu na małą intensywność świecenia izolatorów [5]. W celu polepszenia warunków pomiaru próbkę rdzenia naświetlono większą dawką – 450 Gy. Zliczenia TL scałkowano po temperaturze w zakresie 295 – 500 K (słupki zakreślone) oraz całkowano w zakresie 295 – 420 K (słupki pełne). Oba wyniki pokazują, że główna emisja TL przypada na zakres UV i niebieski. Drugi szeroki pik ma prawdopodobnie maksimum w zakresie czerwonym, niemniej z uwagi na sposób pomiaru obserwujemy tylko jego część w zakresie żółto-pomarańczowym.

Na rysunku 5 przedstawiono TL rdzenia izolatora ceramicznego wyprodukowanego w 1960 roku. Krzywą dopasowano czterema pikami określonymi równaniem (4). Obliczone energie aktywacji poziomów pułapkowych (w kolejności występowania) mają wartości: 0,55 eV; 0,50 eV; 0,90 eV i 0,58 eV. Do obliczeń użyto programu GENOR napisanego przez jednego z autorów niniejszego artykułu. Wykres Arrheniusa dla odcinka początkowego narastania krzywej TL pokazano na rysunku 6. Obliczona tą metodą wartość energii aktywacji wynosi 0,63 eV. Rozbieżność w oszacowaniu energii aktywacji pierwszego pików spowodowana jest prawdopodobnie efektem silnego nakładania się pików. Przybliżenie początkowego narastania funkcjonuje prawidłowo tylko dla pojedynczego pików.

Wnioski

W pracy przedstawiono właściwości termoluminescencyjne wybranych izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich napięć. Analiza krzywych jarzenia TL pokazuje, że materiał izolatora charakteryzuje się dość złożoną strukturą zlokalizowanych poziomów elektronowych. Dla przykładowego izolatora z roku 1960 wykazano istnienie przynajmniej czterech poziomów pułapkowych. Wstępne pomiary spektralne (rys. 4) sugerują istnienie przynajmniej trzech typów centrów rekombinacji. Układ przynajmniej siedmiu poziomów znacząco komplikuje opis teoretyczny (1-2) [7, 8]. Z dobrym przybliżeniem można jednak przyjąć, że pole powierzchni pod każdym pikiem na rysunku 5 (całka z intensywności TL po czasie lub temperaturze) jest proporcjonalne do ilości defektów strukturalnych w materiale ceramicznym izolatora. Metoda termoluminescencyjna daje więc możliwość określania gęstości defektów badanego izolatora.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/07/B/ST8/03890.

LITERATURA

- [1] Horak J., Sieci elektryczne - elementy sieci rozdzielczych cz.1, skrypt Politechniki Częstochowskiej, Wyd. PCz., Częstochowa, 1997
- [2] Marzecki J., Miejskie sieci elektroenergetyczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996
- [3] Kornatka M., Analiza awaryjności sieci średniego napięcia wybranych oddziałów OSD, *Rynek Energii* nr 3 (94), (2011), 99-102
- [4] Chen R., McKeever S.W.S., Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena, *World Scientific*, Singapore, 1997
- [5] Sobota R., Mandowski A., Mandowska E., Luminescencja izolatorów ceramicznych sieci energetycznych średnich napięć, *Elektronika - konstrukcje, technologie, zastosowania*, nr 11,

- 109-111, Wydawnictwo Sigma - Not, Warszawa, 2012
- [6] Mandowska E., Mandowski A., Świątek J., Ultraweak spectrally resolved thermoluminescence, *Macroml. Symp.* 212, (2004), 251-256
- [7] Mandowski A., The model of semi-localized transitions, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38, (2005), 17-21
- [8] Mandowski A., Topology-dependent thermoluminescence kinetics, *Radiat. Protec. Dosim.* 119, (2006), 23-28

Autorzy: dr hab. Arkadiusz Mandowski, Akademia im. Jana Długosza, Instytut Fizyki, ul. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa; dr Ewa Mandowska, Akademia im. Jana Długosza, Instytut Fizyki, ul. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa, E-mail: e.mandowska@ajd.czest.pl; mgr Rafał Sobota, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa; dr Mirosław Kornatka, Wydział Elektryczny, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa.