

Marcin KAŁUŻA, Krzysztof NAPIÓRKOWSKIPOLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI,
ul. Wólczarska 211/215, 90-924 Łódź**Obrazowanie termiczne stanów przejściowych przy załączaniu tyrystora****Dr inż. Marcin KAŁUŻA**

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej. Prowadzi badania nad spiralnymi cewkami scalonymi oraz nad zastosowaniami kamer termowizyjnych do badań układów scalonych i struktur półprzewodnikowych. Zainteresowania naukowe: modelowanie i zastosowania spiralnych cewek scalonych, termowizja, sensory. Od 2008 roku pracuje w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej.



e-mail: marcin.kaluza@p.lodz.pl

Dr inż. Krzysztof NAPIÓRKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej w 1975 r. i podjął pracę w Instytucie Elektroniki PŁ. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Układów Elektronicznych i Termografii. Zajmuje się modelowaniem, analizą i projektowaniem nowoczesnych elektronicznych układów przetwarzania energii (przetwornice impulsowe wysokiej częstotliwości, tłumiki regeneratywne), zastosowaniem termografii w badaniach układów impulsowych mocy.



e-mail: krzysztof.napiorkowski@p.lodz.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące możliwości zastosowania kamery termowizyjnej do rejestracji termogramów szybkich procesów przejściowych generacji ciepła w czasie załączania otwartej struktury półprzewodnikowej tyrystora. Badania wykazały możliwość rejestracji termogramów w czasie załączania przyrządu półprzewodnikowego mocy przy odpowiednim doborze niestandardowych ustawień pracy kamery termowizyjnej.

Słowa kluczowe: termowizja, przyrządy półprzewodnikowe mocy.

Thermal imaging of thyristor turn-on transients**Abstract**

The paper presents the results of investigations on possible use of a thermal imaging camera for the recording of fast transient processes of heat generation during the switching of semiconductor structures in semiconductor power devices, based on measurements of a thyristor semiconductor structure. Using a measurement setup consisting of an IR camera and of a purpose build current pulse generator, the thermal behaviour of the T00-80 thyristor semiconductor structure during turn on was investigated. The thermograms were recorded at speeds reaching 1400 frames per second. Studies of the semiconductor structure of the thyristor mounted in a special holder showed the possibility of using a thermal camera for analyzing the behaviour of power semiconductor devices, however further increase in the temporal resolution of the recording process will be needed. One of the solutions will be to synchronize operation of a pulse generator and a thermal camera, including a controlled, variable time delay between current pulse generation and image acquisition.

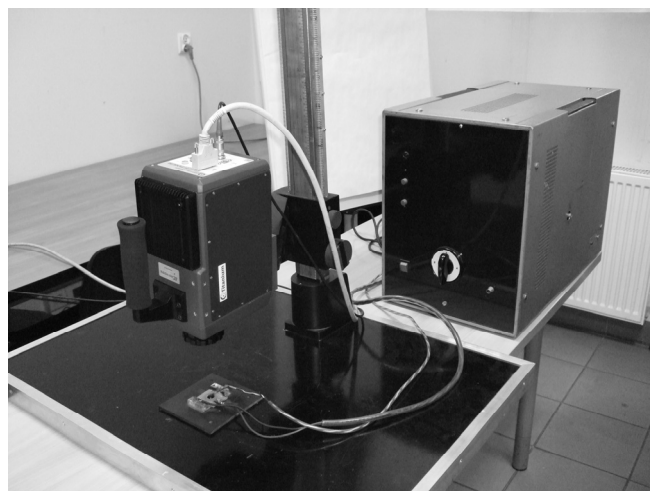
Keywords: thermovision, power semiconductor devices.

1. Wstęp

Artykuł prezentuje wyniki badań przeprowadzonych w Zakładzie Układów Elektronicznych i Termografii Instytutu Elektroniki PŁ nad możliwością rejestracji termogramów obrazujących nagrzewanie struktury półprzewodnikowego przyrządu mocy (w tym przypadku tyrystora), w czasie procesu załączania przyrządu. Proces załączania tego typu przyrządu trwa kilka – kilkanaście mikrosekund, jest więc bardzo krótki w odniesieniu do możliwości rejestracji procesów dynamicznych przez kamerę termowizyjną. Straty mocy w procesie załączania tyrystora zależą głównie od konstrukcji bramki oraz od stromości narastania prądu przewodzenia przyrządu. Ponieważ struktura tyrystora z bramką centralną, po doprowadzeniu impulsu wyzwającego, załącza najpierw w otoczeniu obszaru bramki, w przypadku dużej stromości narastania prądu anodowego prąd płynie, w początkowej fazie procesu załączania, bardzo małą częścią całej struktury tyrystora, generując znaczne straty mocy i nagrzewając tę część struktury przyrządu. W dalszej części procesu załączania tyrystora następuje przejście całej struktury w stan przewodzenia, co prowadzi do zmniejszenia chwilowych strat mocy w przyrządzie półprzewodnikowym.

2. Stanowisko pomiarowe

Do badań wykorzystano stanowisko pomiarowe, składające się z kamery termowizyjnej Cedis Titanium z chłodzoną matrycą InSb (640 x 512 pikseli, rozmiar piksela 15 μm) oraz z opracowanego i zbudowanego w Zakładzie Układów Elektronicznych i Termografii Instytutu Elektroniki PŁ generatora impulsów prądowych (rys. 1). Generator wytwarzał impulsy prądowe o stałej amplitudzie, stałym czasie trwania oraz o regulowanej stromości narastania prądu tyrystora, badanego w czasie procesu załączania. Regulowana stromość narastania impulsu prądu przewodzenia di_T/dt wynosiła 20, 40, lub 80 A/μs. Amplituda impulsów prądu przewodzenia tyrystora I_M wynosiła 270 A. Czas trwania impulsu prądowego t_p był równy, impulsy prądowe były powtarzane z częstotliwością f_p równą 1 Hz.



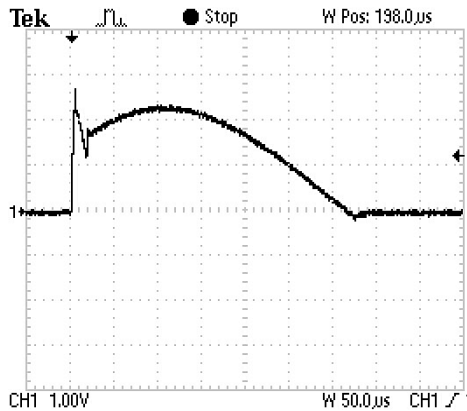
Rys. 1. Stanowisko pomiarowe
Fig. 1. Measurement setup

Częstotliwość powtarzania impulsów prądowych, wynosząca 1 Hz została dobrana tak, aby nagrzewanie badanego elementu półprzewodnikowego następowało praktycznie tylko w czasie trwania impulsu prądowego, a nie było efektem przepływu przez badany przyrząd prądu o wartości średniej, wynikającej ze współczynnika wypełnienia impulsu δ .

$$\delta = t_p f_p, \quad (1)$$

gdzie: t_p - czas trwania impulsu prądowego, f_p - częstotliwość powtarzania impulsów prądowych.

Na rysunku 2 został przedstawiony oscylogram przebiegu impulsu prądowego, wytwarzanego przez generator.



Rys. 2. Oscylogram przebiegu impulsu prądowego wytwarzanego przez generator [120,5 A/dz.]

Fig. 2. Oscillogram of the current pulse produced by a current generator [120.5A/div]

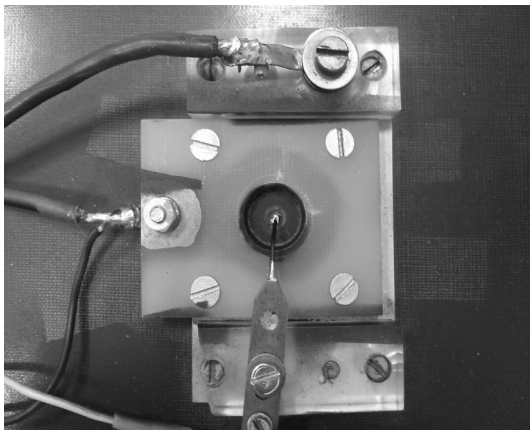
3. Pomiary

Badaniom za pomocą kamery termowizyjnej Cedip Titanium współpracującej z oprogramowaniem Altair została poddana struktura tyrystora T00-80 (rys. 3) o następujących parametrach: $I_{T(AV)} = 80$ A, $U_{DRM} = 400$ V, $I_{TSM} = 1450$ A, $di_T/dt_{max} = 50$ A/μs, $t_{gt} = 7$ μs. Została ona wyjęta z fabrycznej obudowy i umieszczona w specjalnym uchwycie (rys. 4), zapewniającym doprowadzenie napięcia zasilającego i impulsów bramkowych do odpowiednich elektrod przyrządu półprzewodnikowego. Konstrukcja uchwytu pozwala na obserwację odkrytej struktury przyrządu od strony katody przez kamerę termowizyjną. Przed przystąpieniem do badań, ze względu na konieczność uzyskania dużej wartości współczynnika emisyjności, powierzchnia pastylki tyrystora została pokryta warstwą czarnej, matowej farby.



Rys. 3. Struktura tyrystora T00-80 z centralną bramką wzmacniającą

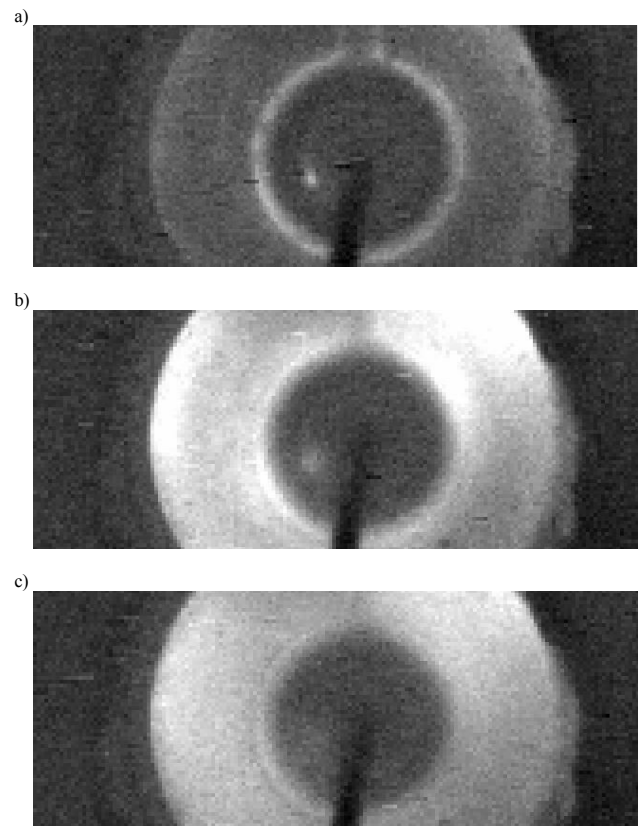
Fig. 3. T00-80 thyristor structure with a central amplifying gate



Rys. 4. Uchwyt pomiarowy

Fig. 4. Measuring holder

Na czas pomiarów kamera została umieszczona na pionowym statywie (rys. 1), w minimalnej umożliwiającej uzyskanie ostrego obrazu odległości od badanego obiektu (30 cm), (co pozwalało równocześnie na uzyskanie maksymalnej rozdzielczości obrazu (ok. 90 μm/piksel). Pierwsze próby rejestracji termogramów obrazujących nagrzewanie struktury tyrystora, ze względu na bardzo szybki proces jego załączania, w stosunku do możliwości rejestracji sekwencji termogramów przez kamerę Cedip Titanium, nie powiodły się. Z tego też względu dokonano próby rejestracji termogramów przy niestandardowych ustawieniach kamery. Po zredukowaniu czasu integracji do 500 μs i zawężeniu pola obserwacji kamery do obszaru 160 x 64 piksele, przeprowadzono korekcję niejednorodności NUC dla takich ustawień, a następnie, po zapisaniu wyników korekcji do pamięci kamery, powtórzono pomiary. Wprowadzone zmiany ustawień kamery umożliwiły rejestrację z prędkością sięgającą 1400 ramek/s. Uzyskane w ten sposób termogramy struktury półprzewodnikowej tyrystora przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



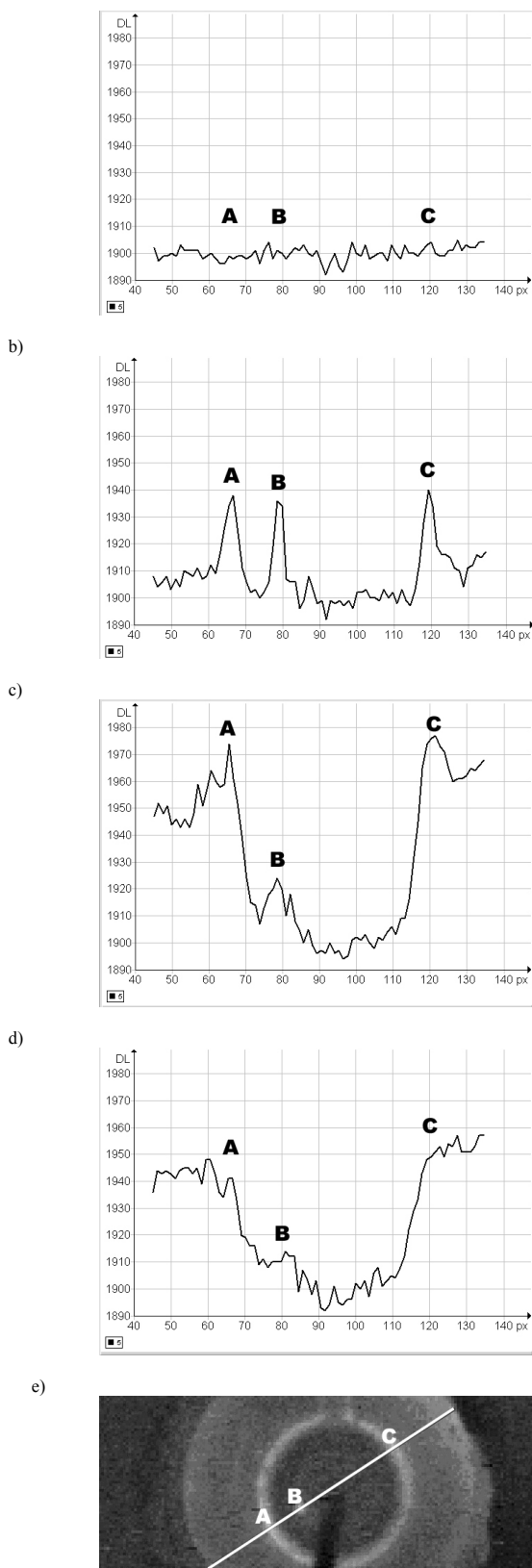
Rys. 5. Sekwencja termogramów obrazująca rozkład temperatury struktury podczas procesu załączania tyrystora

Fig. 5. Sequence of thermograms showing the temperature distribution in the structure during thyristor turn-on

Rysunek 5a przedstawia termogram obrazujący rozkład temperatury struktury po podaniu na bramkę tyrystora impulsu wyzwolającego, powodującego załączenie struktury pełniącej funkcję tyrystora pomocniczego (tzw. „bramka wzmacniająca” [3, 4]) oraz obszaru katody wokół bramki wzmacniającej. Duża gęstość prądu płynącego przez niewielką część całej struktury tyrystora powoduje znaczne straty mocy wywołujące wzrost temperatury tyrystora.

Jaśniejsze fragmenty obrazu odpowiadają wyższej temperaturze struktury przyrządu półprzewodnikowego. Rysunek 5b i 5c przedstawiają termogramy zarejestrowane przez kamerę będące termiczną odpowiedzią na proces załączania tyrystora. Widać na nich powiększanie się obszaru, którego temperatura wzrasta w wyniku przepływu prądu. Termogramy przedstawione na rysunkach 5a, 5b i 5c były rejestrowane kolejno, w odstępach czasu ok. 700 μs.

a)



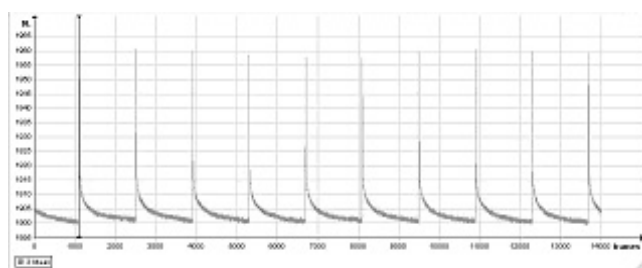
Rys. 6. Rozkład temperatury zmierzonej na powierzchni tyrystora uzyskany za pomocą kamery termowizyjnej podczas procesu załączania tyrystora. Zmierzony maksymalny wzrost temperatury około 80 jednostek cyfrowych (rys. 6 c) - odpowiada wartości $1,3^{\circ}\text{C}$

Fig. 6. Temperature cross-sections measured on the thyristor surface using a thermal camera during thyristor turn-on. The measured maximum temperature rise – approx. 80 DL (Fig. 6c) is equivalent to 1.3°C

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi temperatury zmierzone na powierzchni badanej struktury, wzdłuż przekroju przedstawionego na rysunku 6e. Przekrój 6a odpowiada stanowi tyrystora zaraz przed załączeniem. Przekroje 6b, c i d odpowiadają, odpowiednio, termo-

gramom z rysunków 5a, b i c. Na rysunku 6b widoczne są trzy maksima temperatury odpowiadające kolejno, od lewej, obszarowi katody wokół bramki wzmacniającej, bramce wzmacniającej oraz ponownie obszarowi katody wokół bramki wzmacniającej, po drugiej stronie struktury. Na rysunku 6c widać dalszy wzrost temperatury struktury w obszarze katody, kiedy bramka wzmacniająca przestaje mieć wpływ na dalszy proces załączania tyrystora - temperatura obszaru bramki wzmacniającej obniża się.

Ponieważ praca generatora impulsów prądowych nie była zsynchronizowana z pracą kamery termowizyjnej, w trakcie rejestracji trwającej kilkadziesiąt sekund sekwencji, w każdym cyklu załączenia tyrystora zmieniało się przesunięcie czasowe pomiędzy chwilą wygenerowania impulsu prądowego oraz rejestracją termogramu przez kamerę. Widać to dobrze na rysunku 7, na którym widoczna jest zmiana wartości maksimów temperatury, uzyskiwanych w kolejnych cyklach załączania. Zjawisko to zostało potwierdzone przez porównanie przekrojów temperatury, uzyskiwanych w kolejnych cyklach załączania, w chwili załączenia bramki wzmacniającej (rys. 6b). W dalszych badaniach konieczna będzie synchronizacja pracy generatora i kamery termowizyjnej, z możliwością regulacji przesunięcia czasowego pomiędzy generacją impulsu prądowego i akwizycją obrazu przez kamerę. Powinno to pozwolić na dokładniejsze obrazowanie dynamicznych procesów elektrotermicznych zachodzących w przyrządzie półprzewodnikowym, wykorzystując do badań tą samą kamerę termowizyjną.



Rys. 7. Przebieg w czasie temperatury dla wybranego fragmentu powierzchni tyrystora. Kolejne maksima odpowiadają kolejnym załączeniom tyrystora
Fig. 7. Time changes of the average temperature of the thyristor chosen area. Subsequent maximum values correspond to successive thyristor turn-ons

4. Wnioski

Dzięki dobraniu niestandardowych parametrów pracy użytej kamery termowizyjnej i zwiększeniu prędkości rejestracji do 1400 ramek/s (co około $700\ \mu\text{s}$) udało się zarejestrować obraz termiczny procesu załączania tyrystora. Zastosowanie szybszej kamery termowizyjnej pozwoliłoby na rejestrację większej liczby termogramów w jednostce czasu, a tym samym na dokładniejsze obrazowanie dynamicznych procesów elektrotermicznych zachodzących w przyrządzie półprzewodnikowym.

5. Literatura

- [1] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczterwieni. Podstawy i zastosowanie. Politechnika Łódzka, Łódź 2011.
- [2] Salem T.E. et al.: Validation of Infrared Camera Thermal Measurements on High-Voltage Power Electronic Components, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, str. 773 - 78, nr 5, 2007.
- [3] M. Fontaine et al.: Simultaneous measures of temperature and expansion on electronic compound, 2011 SEMI-THERM Symposium, str. 203 - 207.
- [4] Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody. Wyd. Pol. Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [5] Thomas K.P., Webb P.W.: Transient thermal impedance measurement in power semiconductor devices, IEE Colloquium on New Developments in Power Semiconductor Devices, str 3/1 - 3/6, 1996.
- [6] Blicher A.: Thyristor physics. Springer-Verlag, New York 1976.