

Układ stabilizacji temperaturowej zestawu niezależnie pracujących diod laserowych

Streszczenie. W publikacji zawarto techniczne aspekty zasilania diod laserowych. Przedstawione zostały również autorskie rozwiązania stabilizacji termicznej diod laserowych w układzie sprzężenia zwrotnego, zrealizowany elektroniczny układ stabilizatora oraz cyfrowy system sterujący jego pracą.

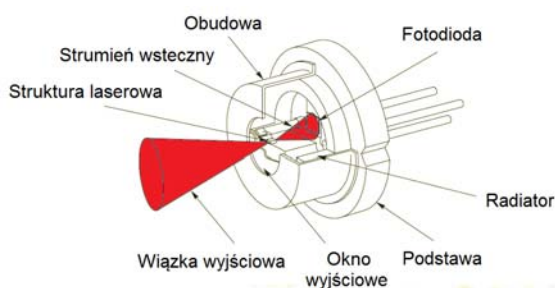
Abstract. In the paper was presented the technical aspects for supply of laser diodes. Article includes author's solutions of thermal stabilization of laser diodes in the system of feedback circuit, implemented an electronic stabilization set and a digital control system of its work. (**Temperature stabilization of the set of laser diodes working independently**).

Słowa kluczowe: dioda laserowa, sterowniki diod laserowych, regulacja temperatury, stabilizacja układu, układy programowalne.

Keywords: laser diode, laser drivers, temperature control, feedback stabilization, programmable logic devices.

Wstęp

Podobnie jak diody LED, diody laserowe charakteryzują się widmowym współczynnikiem temperaturowym z przedziału od 0,1 nm/K do 0,4 nm/K. W bezpiecznym obszarze pracy, poniżej wartości natężenia prądu powodującej degradację struktury w danej temperaturze, zmiana temperatury powoduje przesunięcie widmowej charakterystyki emisyjnej. Powyższa właściwość wykorzystywana jest w układach termicznego przestrajania charakterystyki widmowej źródła promieniowania w zakresie pojedynczych nm. Monitorowanie mocy promieniowania diody laserowej jest podstawą funkcją układu zasilającego, czyli sterownika diody [1]. Większość diod laserowych zawiera w swojej strukturze wewnętrznej wbudowane fotodiody monitorujące (rys.1), których sygnał wykorzystywany jest do stabilizacji wartości emitowanej mocy optycznej. Poprawnie funkcjonujący sterownik powinien wytwarzać stały lub impulsowy prąd zasilający, którego natężenie zależy nie tylko od nastaw potencjometru, lecz również od wartości α wyjściowej mocy optycznej i temperatury pracy diody.



Rys.1. Budowa wewnętrzna diody laserowej

Opisany w niniejszej publikacji, układ stabilizacji temperaturowej diody laserowej został zaprojektowany i zastosowany w opracowanym oświetlaczu laserowym dla potrzeb biostymulacji ludzkich tkanek [2,3,4]. Wspomniany oświetlacz złożony jest z zestawu kilkudziesięciu, niezależnie sterowanych diod laserowych średniej mocy [4,5]. Uwarunkowania konstrukcyjne, takie jak: wielotorowość sterowania, rozproszenie mocy zasilania, odprowadzanie ciepła oraz ergonomiczność eksploatacyjne – wymusiły konieczność dekompozycji systemu na kilka kaset składowych. Poszczególne kasety oświetlacza posiadają podobną konstrukcję i są w pełni autonomiczne

pod względem funkcjonalnym. Każda kasetka zasilana i kontroluje temperaturę pracy 10 emiterów laserowych. Może ona pracować autonomicznie lub komunikować się z nadrzędnym systemem sterującym w postaci mikrokomputera. Funkcję lokalnego sterownika kasetki pełni układ FPGA. Układ ten steruje współbieżnie zasilaczami poszczególnych diod, rejestrując i wytwarzając niezbędne sygnały sterujące na poziomie sprzętowym. W dalszej części publikacji opisano sposób realizacji układu stabilizacji temperaturowej pojedynczej kasetki.

Zastosowana metoda stabilizacji temperaturowej

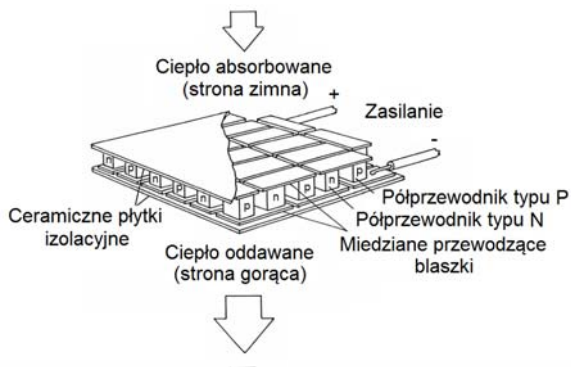
Żywotność diod laserowych charakteryzuje się dużym rozrzutem technologicznym. W przypadku najwyższej jakości diod szacowana jest na poziomie kilkaset tysięcy godzin pracy ciągłej w warunkach laboratoryjnych. W rzeczywistości jest to znacznie krótszy przedział czasowy gdyż bardzo mała struktura emitera jest bardzo wrażliwa na wszelkiego rodzaju przeciążenia [6]. Najczęstsze przyczyny uszkodzeń diod wynikają z przekroczenia maksymalnej mocy promieniowania optycznego, przekroczenia dopuszczalnego natężenia prądu oraz wyładowań elektrostatycznych. Zbyt wysoka gęstość mocy optycznej wywołuje nieodwracalne uszkodzenie struktury diody, w tym uszkodzenia termiczne.

Wzrost temperatury w obszarze czynnym struktury diody laserowej spowodowany jest stratami mocy towarzyszącymi konwersji energii elektrycznej na energię promieniowania optycznego. Nawet diody laserowe małej mocy powinny być wyposażone w układ stabilizacji termicznej, gdyż wartość prądu granicznego i sprawność energetyczna diody laserowej zależy od temperatury złącza. W diodach laserowych pozbawionych układów rozpraszania ciepła, wewnętrzne dodatnie termiczne sprzężenie zwrotne w krótkim czasie może doprowadzić do uszkodzenia diody.

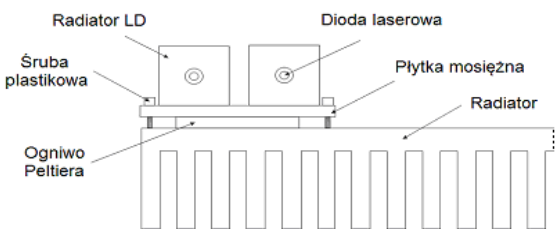
Wynika to z faktu, iż sterownik diody rejestruje jedynie natężenie prądu wewnętrznej fotodiody i na tej podstawie wyznacza amplitudę prądu zasilającego [7,8]. Wzrost wewnętrznej temperatury struktury powoduje zmniejszenie wyjściowej mocy optycznej co automatycznie powoduje zmniejszenie prądu fotodiody. Sterownik rejestrując mniejszą amplitudę sygnału zwrotnego usiłuje skompensować spadek mocy optycznej zwiększając natężenie prądu zasilającego. Wraz ze wzrostem prądu zasilającego następuje dalszy wzrost temperatury struktury diody a samonapędzające się zjawisko staje się niesterowalne. W efekcie albo dioda ulega uszkodzeniu

albo układ zatrzymuje się w punkcie maksymalnego natężenia prądu wyjściowego sterownika, co nie ma nic wspólnego z normalną pracą układu stabilizacji mocy wyjściowej diody.

Zazwyczaj w układach stabilizacji termicznej diod laserowych stosuje się aktywne układy rozpraszania ciepła. W omawianym przypadku zastosowano rozwiązanie wykorzystujące moduł ogniwa termoelektrycznego (Peltiera). Ogniwo takie (rys.2) złożone jest z dwóch równoległych płytek ceramicznych, rozdzielonych strukturami półprzewodnikowymi typu n i p wykonanymi z domieszkowanego tellurku bizmutu. Struktury półprzewodnikowe połączone szeregowo zasilane są prądem stałym o kontrolowanym natężeniu. Przepływ prądu powoduje: przejścia elektronów na wyższy poziom energetyczny wymagające dostarczenia energii lub na niższy poziom wiążący się z wydzielaniem energii. Energią pobieraną jak i wydzielaną jest energia cieplna. Zatem ogniwo Peltiera pełni pompy transportującej ciepło od strony "zimnej" do "gorącej" w zależności od kierunku przepływu prądu zasilającego. Zazwyczaj na stronie zimnej montowany jest radiator z diodą laserową LD (rys.3), zaś na stronie gorącej radiator główny z aktywnym układem rozpraszania ciepła. Pomiedzy konstrukcjami strony gorącej i zimnej nie powinno istnieć połączenie galwaniczne.



Rys.2. Schemat funkcjonalny ogniwa Peltiera



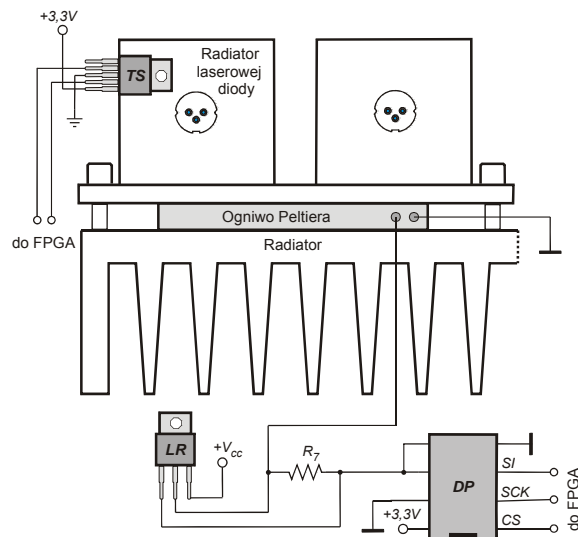
Rys.3. Sposób montażu układu chłodzenia diod laserowych

Rozwiązanie konstrukcyjne układu

Do sterowania pięcioma ogniwami Peltiera zamontowanymi na radiatorze głównym kasety opracowano moduł z oddzielnymi sterownikami poszczególnych ogniw. Schemat części wykonawczej sterownika pojedynczego ogniwa przedstawiono na rysunku 4. Zawiera on między innymi scalony termometr cyfrowy TS oraz część wykonawczą złożoną ze stabilizatora liniowego LR i potencjometru cyfrowego DP.

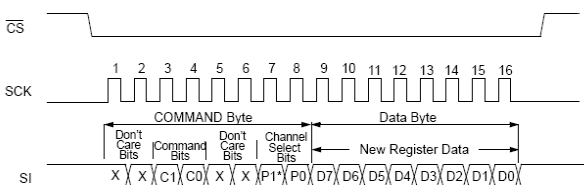
System stabilizacji pracuje w układzie sprzężenia zwrotnego. Sterownik FPGA ustawia przybliżoną wartość napięcia zasilającego ogniwo Peltiera, która odpowiada oczekiwanej temperaturze pracy diody laserowej. Następuje to w wyniku zmiany nastaw potencjometru cyfrowego DP

włączonego w obwód przestrajanego stabilizatora liniowego LR. W związku z tym, że ogniwo Peltiera posiada charakter rezystancyjny, natężenie prądu zasilającego jest proporcjonalne do napięcia na jego zaciskach. Proporcjonalnie do wartości natężenia prądu zasilającego ogniwo zmienia się jego różnica temperatur strony gorącej i zimnej. Zatem w ustalonych warunkach rozpraszania ciepła strony gorącej, w stałej temperaturze strony gorącej, wartość temperatury strony zimnej jest odwrotnie proporcjonalna do natężenia prądu zasilającego. Równolegle do kontrolowanej wartości początkowej natężenia prądu zasilającego ogniwo dokonywany jest pomiar temperatury radiatora diody laserowej za pomocą termometru TS. Jeżeli uzyskana temperatura jest nieadekwatna w stosunku do wartości oczekiwanej układ FPGA dokonuje stosownej korekty prądu zasilającego. Ze względu na występującą w układzie bezwładność termiczną, układ osiąga stan ustalony po upływie stałej czasowej. Dynamika układu zależy głównie od: pojemności termicznej radiatorów, mocy zastosowanego ogniwa, wartości natężenia prądu zasilającego oraz skuteczności rozpraszania ciepła strony gorącej.



Rys.4. Układ wykonawczy stabilizacji termicznej

Występujący w układzie potencjometr DP był obsługiwany bezpośrednio przez FPGA za pośrednictwem trójprzewodowej magistrali SPI [9]. Sygnałami sterującymi magistrali są: sygnał zegarowy SCK, sygnał zezwolenia CS oraz wejście danych szeregowych SI. Magistrala może komunikować się z układem wykonawczym z częstotliwością do 10 MHz. Słowo sterujące (rys.5) do potencjometru jest przesyłane w 16 taktach zegarowych.



Rys.5. Charakterystyka czasowa sterowania potencjometrem [10]

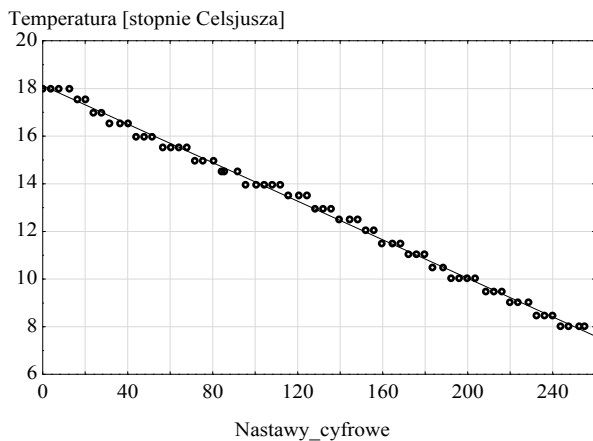
W podobny sposób układ FPGA dokonuje odczytu temperatury radiatora diody laserowej z termometru cyfrowego TS. Przy czym komunikacja obu układów jest realizowana za pośrednictwem sygnałów magistrali I2C

[11]. Cykl odczytu składa się z (rys.6): bitu startu S, siedmiobitowego adresu, bitu sterującego RD, bitu potwierdzenia ACK, ośmiobitowych danych zawierających wartość zmierzonej temperatury, dodatkowego bitu NACK i bitu stopu P.

S	Address	RD	ACK	Data	NACK	P
	7 Bits			8 Bits		

Rys.6. Cykl odczytu temperatury z termometru TS [12]

Wyniki pomiarów układu stabilizacji termicznej przedstawiono na rysunku 7. Zawierają one zależność temperatury radiatora (diody laserowej) od wartości nastaw cyfrowego. W celu poprawy czytelności danych cyfrowe wartości liczby jednobajtowej zapisano jako liczby dziesiętne. Otrzymana charakterystyka jest zbliżona do zależności liniowej, niewielkie przedziałowe nieliniowości nie wynikają z koncepcji układu lecz ze zbyt małej rozdzielczości nastaw cyfrowych. W układzie zastosowano 8-bitowy potencjometr cyfrowy. Połączenie szeregowo dwóch potencjometrów: o większej oraz mniejszej wartości znacznie zmniejszyłoby błąd nieliniowości regulacji.



Rys.7. Wyniki pomiarów układu regulacji temperatury

Podsumowanie

Opisany w publikacji układ stabilizacji temperatury umożliwia kontrolowanie temperatury pracy zestawu diod laserowych oświetlacza z rozdzielczością temperaturową około 1 K. W omawianym przypadku jest to wystarczająca dokładność, umożliwiającą przestrajanie widmowej charakterystyki emisyjnej źródła promieniowania w terapii LLLT. Przedstawione rozwiązanie można również zastosować w lampach LED-owych, zawierających niezależne, punktowe źródła światła, pracujące w różnych zakresach widmowych. W opisanej koncepcji zrezygnowano z centralnego systemu rozpraszania ciepła na rzecz kilku układów rozproszonych rozmieszczonych w kasecie. W przypadku oświetlaczy laserowych był to warunek termicznego strojenia diod laserowych, który można też zastosować w przypadku LED-ów. Takie podejście umożliwia osiągnięcie zupełnie nowych charakterystyk eksploatacyjnych, niedostępnych w tradycyjnych układach pracujących w stałej temperaturze.

Wielokanałowa praca systemu stawia określone wymagania cyfrowemu układowi sterującemu. W przypadku oświetlacza laserowego, układ ten nie tylko obsługuje system stabilizacji termicznej lecz również kontroluje 10 zasilaczy diod laserowych. Taki stan powoduje konieczność

odczytu, ustawiania i przetwarzania w czasie rzeczywistym kilkudziesięciu sygnałów jednocześnie [13,14]. W większości przypadków są to sygnały skorelowane lokalnie, dzięki czemu do ich obsługi można zaimplementować kilkanaście niezależnie pracujących algorytmów. Takie możliwości stwarzają współczesne układy programowalne. Z tego względu sterownik cyfrowy został oparty na prototypowym układzie FPGA.

LITERATURA

- [1] iC Haus: iC-WK, iC-WKL Application Notes 2.4V CW Laser Diode Driver, www.ichaus.de/product/iC-WK%20iC-WKL, 2012
- [2] Gryko Ł., Zając A., Układ optyczny do równomiernego naświetlania monowarstw komórek promieniowaniem z zakresu okna transmisji tkanek, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89 (2013), nr 9, 232-235
- [3] Gryko Ł., Gilewski M., Szymańska J., Zając A., Rosc D., The concept of the set to objectification of LLLT exposure, *Proceedings of SPIE Vol. 8703*, (2013), p. 6
- [4] Gryko Ł., Zając A., Gilewski M., Szymańska J., Goralczyk K., Optoelectronic set to objectification irradiation of cell cultures in low level laser therapy procedures, 12th IFAC/IEEE International Conference: Programmable devices and embedded systems: PdeS 2013, Velke Karlovice (Czech Republic) (2013), 306-311
- [5] Gryko Ł., Zając A., Nowe emitory i detektory w urządzeniach do terapii LLLT, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88 (2012), nr 11b, 33-35
- [6] LASORB (2012), *Laser diode damage mechanisms*, Available from: www.lasorb.com/03_background-info.htm. [20 February 2012]
- [7] Gilewski M., An application of PLDs in diode laser drivers, 12th IFAC/IEEE International Conference: Programmable devices and embedded systems: PdeS 2013, Velke Karlovice (Czech Republic) (2013), 302-305
- [8] Gilewski M., Programowalny sterownik diod laserowych oraz LED-ów, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88 (2012), nr 3a, 78-81
- [9] Intersil®, SPI Protocol and Bus Configuration of Multiple DCPs, Application note No AN1340.0 (2007), <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an13/an1340.pdf>
- [10] Microchip (2012), *MCP41XXX/42XXX Single/dual digital potentiometer with SPI™ interface*, Available from: www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/11195c.pdf. [20 February 2012]
- [11] Himpe V., Mastering the I2C Bus: LabWorX 1, Amazon.co.uk, <http://www.amazon.co.uk/Mastering-I2C-Bus-LabWorX-1/dp/090570598X>.
- [12] Microchip (2013), *TC74 Tiny serial digital thermal sensor*, Available from: www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21462c.pdf. [20 February 2013]
- [13] Gilewski M., Adaptacyjny układ sterowania LED-ów I diod laserowych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, R. 59 z. 260 (2012), 121-128
- [14] Gilewski M., Algorytm pracy programowalnego sterownika z optycznym sprzężeniem zwrotnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88 (2012), nr 5a, 158-161

Publikacja została przygotowana w ramach realizacji pracy statutowej S/WE/4/2013.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Andrzej Zając, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: azajac@wat.edu.pl;
mgr inż. Łukasz Gryko, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: l.gryko@doktoranci.pb.edu.pl;
dr inż. Marian Gilewski, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Świetlnej, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, E-mail: pbwemagi@pb.edu.pl.