

Przegląd metod zasilania alternatywnego w bliskim otoczeniu człowieka

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono analizę technik przetwarzania energii rozproszonej na elektryczną, stanowiących alternatywę dla konwencjonalnych metod zasilania układów elektronicznych. Zaprezentowano i omówiono cztery komercyjnie dostępne typy przetworników, dających możliwość pozyskiwania i przetwarzania energii obecnej w bliskim otoczeniu człowieka. Do badań wybrano konwerter piezoelektryczny, termoelektryczny oraz dwa przetworniki elektromagnetyczne pracujące w różnych zakresach długości fali, wraz z dopasowanymi do nich układami przetwornic. W przypadku każdego z nich wyznaczono parametry wyjściowe tj. napięcie, moc, rezystancję oraz obciążalność prądową. Zweryfikowano również zdolność testowanych źródeł do zasilania i utrzymania ciągłej pracy mikroprocesorowego układu pomiarowego opartego na procesorze ARM Cortex M3. Przetwornikami charakteryzującymi się największymi wartościami mocy wyjściowej, w zakresie 120-180 μ W, okazały się przetwornik piezoelektryczny oraz termogenerator.

Abstract. The paper presents analysis of different energy harvesting techniques being an alternative to conventional methods of powering electronic devices. Four, commercially available, types of transducers allowing to harvest and further convert energy that exists in close proximity to humans have been described and discussed. Piezoelectric, thermoelectric and two electromagnetic transducers, working for different wavelength range, together with matching voltage converter systems have been selected for experiments. For each of them output parameters, namely, voltage, power, resistance and overload have been determined. The ability of tested sources to power and maintain continuous operation of measuring system based on microprocessor ARM Cortex M3 has been verified. Transducers characterized by the highest values of output power, in the range of 120-180 μ W, were piezoelectric and thermoelectric converters. (**Review of methods for alternative power supply in close proximity to humans**).

Słowa kluczowe: pozyskiwanie energii, przetworniki piezoelektryczne, przetworniki termoelektryczne, przetworniki elektromagnetyczne, zasilanie alternatywne.

Keywords: energy harvesting, piezoelectric transducers, thermoelectric transducers, electromagnetic transducers, alternate power supply.

Wstęp

Współcześnie, ewolucja przyrządów półprzewodnikowych oraz analogowych, cyfrowych i mikroprocesorowych układów scalonych zmierza przede wszystkim w kierunku ich miniaturyzacji i integracji, a także ograniczenia poziomu mocy pobieranej ze źródła zasilania. Wynika to z faktu, że najbardziej rozwijającym się segmentem elektroniki są aktualnie wszelkie urządzenia przenośne. Zapewnienie atrybutu mobilności na akceptowalnym poziomie wymusza projektowanie układów o możliwie najwyższej sprawności, zwiększanie pojemności zasobników energii elektrycznej, optymalizację trybów pracy oraz algorytmów oprogramowania systemowego, jak również dynamiczne rekonfigurowanie układów w celu dostosowania ich wydajności do bieżących potrzeb [1]. Coraz częściej stosowanymi metodami, mającymi na celu zwiększenie mobilności urządzeń elektronicznych, są techniki pozyskiwania energii rozproszonej, tzw. *energy harvesting*, na podstawie których opracowywane są alternatywne lub dodatkowe źródła zasilania [1, 2, 3, 4]. Wiele współcześnie dostępnych systemów sensorycznych, mikroprocesorowych oraz urządzeń przenośnych charakteryzuje się ultra małym poborem mocy (ang. *ULP devices*) na poziomie znacznie niższym niż 1 mW [5, 6]. W takich przypadkach podejmowane są próby projektowania obwodów zasilających, opartych wyłącznie o metody alternatywne [1, 5, 7, 8], nie zmniejszających jednak mobilności urządzeń. Do najczęściej wykorzystywanych w tym celu źródeł zasilania alternatywnego zalicza się przetworniki elektromechaniczne, elektromagnetyczne i termoelektryczne [3, 4, 9]. W kontekście wspomnianych uwarunkowań kolejne rozdziały artykułu zawierają analizę wybranych przetworników piezoelektrycznych, elektromagnetycznych i termoelektrycznych o największym potencjale aplikacyjnym, które mogą zostać wykorzystane do pozyskiwania energii elektrycznej z bliskiego otoczenia człowieka.

Przegląd metod pozyskiwania energii

Różnorodność prezentowanych rozwiązań dotyczących

miniaturowych przetworników małej mocy, umożliwiających pozyskiwanie energii elektrycznej z otoczenia, tzw. *energy harvesterów*, spowodowana jest istnieniem wielu metod konwersji energii, a także technologii wytwarzania oraz konstrukcji samych przetworników.

Tabela 1. Zestawienie niskoczęstotliwościowych układów pozyskiwania energii wykorzystujących przetworniki kinetyczne

Typ przetwornika	Moc wyjściowa [μ W]	Częstotliwość [Hz]	Parametry gabarytowe	Opracowanie
Piezo PZT/PVDF	1800/1100	0,91	20000/6250 mm ³	Kymissis [12]
Piezo PZT	8400	0,91	37161 mm ³	Schenck [13,14]
Piezo PZT	6000	2,0	12348 mm ³	Khaligh [7]
Piezo PZT	80	5,0	2185mm ³	Bayrashev [15]
Elektromagnetyczny LTCC/beryl/miedź	7000	35,0	9000 mm ³	Scherrer [16]
Elektrostatyczny Al/Poliester	58/36	4,76/6,0	780/1200 g	Tashiro [17]
Elektrostatyczny Polimer/szkło	6	10	800 mm ³	Arakawa [18]
Elektromagnetyczny NiFe/CoFe /miedź	600	0,1	12000 mm ³	Ongaro [19]

Do najczęściej stosowanych zalicza się przetworniki kinetyczne, cieplne, elektromagnetyczne lub hybrydowe, a taka klasyfikacja wynika bezpośrednio z formy energii przekształcanej na elektryczną w przypadku każdego z wymienionych typów urządzeń [4]. Wśród przetworników kinetycznych najczęściej wykorzystywane są konstrukcje bazujące na elementach piezoelektrycznych, elektromagnetycznych oraz elektrostatycznych [3, 9]. Konwertery antenowe HF + SHF oraz ogniwa fotowoltaiczne w zakresie światła widzialnego lub podczerwonego należą do najpopularniejszych konstrukcji elektromagnetycznych [5], z kolei generatory półprzewodnikowe, bazujące na ogniwie Peltiera-Seebecka są podstawą układów

termoelektrycznych [1]. Analizując komercyjne, prototypowe i laboratoryjne konstrukcje przetworników małej mocy można wskazać takie, które umożliwiają konwersję energii pochodzącej od aktywności człowieka bądź z jego najbliższego otoczenia. Wśród najpopularniejszych i najbardziej efektywnych przetworników energii dla alternatywnych układów zasilania są konwertery piezoelektryczne [2, 9, 10]. W tabeli 1 zaprezentowano konstrukcje bazujące na wzbudzaniu okresowym, nie przekraczającym kilkudziesięciu Hz, co wynika z zakresu potencjalnych możliwości kinetycznych organizmu ludzkiego [11].

Tabela 2. Zestawienie układów pozyskiwania energii wykorzystujących przetworniki antenowe i fotowoltaiczne

Typ przetwornika elektromagnetycznego	Moc wyjściowa/powierzchnia	Zakres długości fali/ moc	Opracowanie
Antena – 17 dBm	10 μ W	830 MHz	Ramesh [20]
Antena	76,35 μ W	2400 MHz	Hong [21]
Ogniwo PV Si krystaliczne	31 mW/143,7 cm^2	Światło widzialne/1000 W/m^2	Panasonic HIT [22]
Ogniwo PV GaAs	33,3 mW/0,9927 cm^2	Światło widzialne/1000 W/m^2	Alta Devices [23]
Ogniwo PV CuInGaSSe	25,3 mW/0,496 cm^2	Światło widzialne/1000 W/m^2	Nakamura [24]
Ogniwo PV InGaAsSb	220 mW	podczerwień	Choi [25]

Z tabel 1 i 2 wyraźnie wynika, że grupa przetworników elektromagnetycznych jest zmiennie różna od wcześniej opisywanych konwerterów kinetycznych ze względu na statyczny charakter metod przetwarzania. Ponadto, przetworniki antenowe i fotowoltaiczne (ogniwa PV), w przeciwieństwie do termo- i piezogeneratorów, nie mają bezpośredniej styczności z ciałem człowieka, lecz pozyskują energię z jego bliskiego otoczenia, co wymaga ich odpowiedniej ekspozycji. W tabeli 2 zestawiono wspólnie osiągnięte wartości mocy dla przetworników elektromagnetycznych w różnym zakresie długości fali.

Podobnie jak w przypadku konwerterów elektromagnetycznych, termogeneratory (TEG) stanowią alternatywę dla przetworników kinetycznych ze względu na

statyczny charakter metod konwersji energii cieplnej na elektryczną. W tym przypadku gradient temperaturowy potrzebny do wzbudzenia termogeneratora pochodzi najczęściej z różnicy temperatur ciała człowieka i otoczenia. Uzyskane w ten sposób moce elektryczne *energy harvesterów* TEG na bazie BiTe lub SiGe nie przekraczają 50 mW/cm^2 przy gradiencie temperaturowym nie wyższym niż 50 K [1].

Konfiguracja układów zasilania alternatywnego

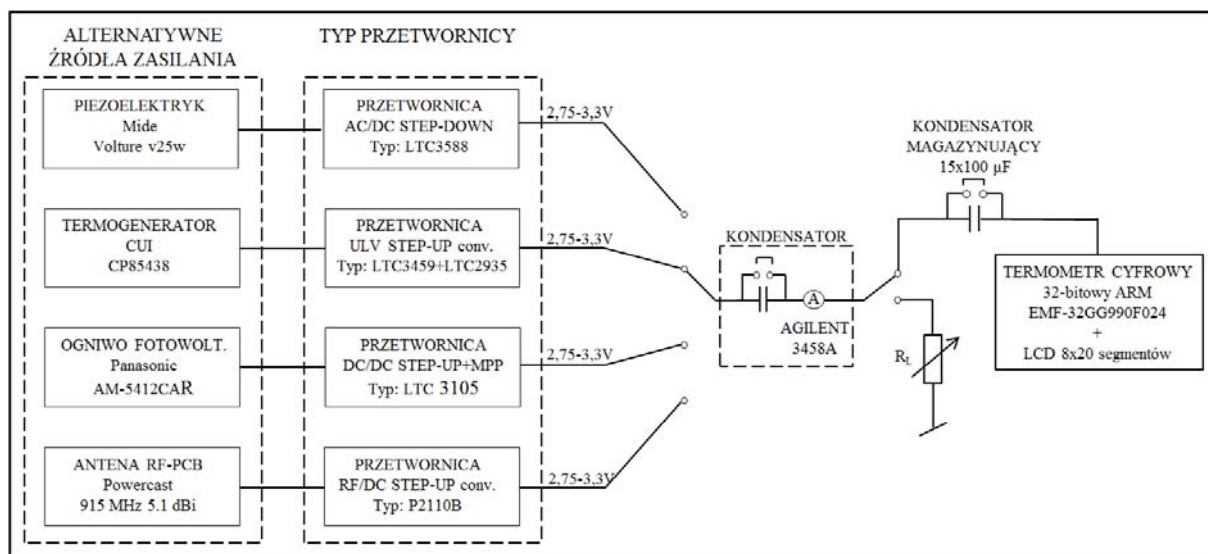
W celu opracowania układu zasilającego, wykorzystującego alternatywne źródła energii, przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych obejmujących wybrane, dostępne komercyjnie, przetworniki oraz układy przetwornic AC/DC i DC/DC. Zestawienie testowanych przetworników, mających pełnić rolę źródeł energii przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie badanych przetworników

Typ przetwornika	Opis	Wymiary
Piezoelektryczny/PZT	Vulture v25w, prod. Mide	57 × 40 mm
Termoelektryczny	CP85438, prod. CUI	40 × 40 mm
Fotowoltaiczny/amorficzny Si	AM-5412CAR, prod. Panasonic	50 × 33 mm
Antena kierunkowa RF-PCB na pasmo EGSM 880-915 MHz	H 122°/V 68°, zysk 6,1 dBi, prod. Powercast	175 × 50 mm

Na rysunku 1 przedstawiono konfiguracje zoptymalizowanych układów przetwarzania AC/DC i DC/DC, opracowanych dla przetworników zestawionych w tabeli 3. Wybór różnych typów przetwornic wynika z faktu, że każdy z badanych elementów charakteryzuje się innymi parametrami wyjściowymi tj. zakresem zmian napięcia wyjściowego, rezystancją wyjściową i obciążalnością prądową.

Każdy z wariantów zapewniał zasilanie prądem stałym przy napięciach w zakresie od 2,75 V do 3,3 V i obciążalności określonej typem testowanego przetwornika. Jako układ obciążający zastosowano termometr cyfrowy, zbudowany w oparciu o 32-bitowy mikrokontroler z rdzeniem typu ARM-Cortex M3 oraz wyświetlacz alfanumeryczny LCD (8 × 20 segmentów).



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego

Wyznaczanie mocy wyjściowej układów zasilania

Pierwszym etapem badań było określenie obciążalności układów zasilających. W tym celu zastosowano regulowane obciążenie rezystancyjne oraz układ bezpośredniego pomiaru prądu, wykorzystujący multimetr Agilent 3458A. W każdym z rozpatrywanych przypadków regulowana była wartość rezystancji obciążającej R_L , w celu określenia warunków najlepszego dopasowania obciążenia do źródła. W rezultacie wyznaczono wartość graniczną rezystancji R_L , przy której obserwowano 10% spadek wartości napięcia wyjściowego zasilacza. Dodatkowo, określono przedział czasu t_{on} trwający od chwili wzbudzenia przetwornika do momentu zmiany stanu logicznego PGOOD potwierdzającego uruchomienie przetwornicy. W dalszej części badań, funkcję obciążenia pełnił układ termometru cyfrowego, w którym mikrokontroler wykonywał cykliczny pomiar temperatury w trybie *deep sleep mode*. W tej konfiguracji układ znamionowo obciążał zasilacz prądem 1,1 μ A.

Metody wzbudzenia testowanych przetworników różniły się w zależności od ich typu. Przetwornik piezoelektryczny zmontowany w postaci belki jednostronnie utwierdzonej wzbudzano impulsowo za pomocą elektromagnesu EMA-0415L-12 z częstotliwością 3 Hz. Termogenerator przytwierdzony stroną zimną do radiatora o temperaturze otoczenia 22°C ogrzewano od strony gorącej radiatorem z obiegiem wodnym, zasilanym z chłodnicy recyrkulacyjnej RC030H03 firmy Lytron. Uzyskano w ten sposób gradient temperatury na poziomie 10-12°C. Ogniwo fotowoltaiczne wzbudzano poprzez oświetlenie go światłem widzialnym na poziomie 300 lx. Układ odbiorczy wyposażony w antenę kierunkową (H 122°/V 68°) na pasmo EGSM 880-915 MHz umieszczono w odległości 60 cm od telefonu komórkowego z aktywowaną funkcją *uplink* transmisji EGPRS. Wyniki pomiarów prądu obciążenia I_L przy granicznej wartości R_L , maksymalnej mocy wyjściowej zasilacza P_m oraz czasów t_{on} zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie wyników pomiarów parametrów testowanych układów zasilających

Typ przetwornika	Opis	I_L [μ A]	P_m [μ W]	R_L [k Ω]	t_{on} [s]
Piezoelektryczny/PZT	3 Hz	55,2	182	60	15
Termoelektryczny	ΔT 10-12°C	36,4	120	30	22
Fotowoltaiczny/amorficzny Si	otoczenie	6,67	22	500	31
Fotowoltaiczny/amorficzny Si	LED biały 300 lx	412	1360	8	5
Antena kierunkowa RF-PCB na pasmo EGSM 880-915 MHz	Nadajnik 3W GSM 900 0,6 m	303	1000	10	6
Antena kierunkowa RF-PCB na pasmo EGSM 880-915 MHz	Telefon EDGE 0,6 m	3,3	10,9	100	45

Otrzymane wyniki pomiarów wskazują, że największe wartości mocy wyjściowej uzyskano dla *harwestera* pracującego w oparciu o ogniwo fotowoltaiczne i przetwornicę RF, pracującą w zakresie częstotliwości 880÷915 MHz. Jednakże w obydwu przypadkach, pomiary wymagały obecności dodatkowego, zewnętrznego źródła promieniowania elektromagnetycznego. Rozpatrując układy zasilające, pracujące bez konieczności stosowania dodatkowych źródeł energii, największą wydajnością odznaczał się układ przetwornika piezoelektrycznego Voltre v25w. Otrzymane dla niego wartości mocy były średnio o 30% większe niż dla termogeneratora i blisko dziesięciokrotnie większe niż w przypadku zastosowania

ogniwa fotowoltaicznego. Przekłada się to tym samym na warunki zasilania i tryb pracy systemu mikroskopowego, a co za tym idzie, na czas załączenia układu pomiarowego, który okazał się być najkrótszy w przypadku zastosowania przetwornika piezoelektrycznej. Warto również zaznaczyć, że czas ten jest trzykrotnie krótszy niż w przypadku zastosowania anteny RF wzbudzanej energią emitowaną podczas aktywnej komunikacji EGPRS telefonu komórkowego.

Podsumowanie

Zaprezentowana w niniejszym artykule analiza alternatywnych źródeł zasilania wykazała, że przy zastosowaniu tego typu urządzeń możliwe jest załączenie i utrzymanie ciągłej pracy sensorycznego układu mikroprocesorowego EMF-32GG990F024, opartego na 32-bitowym procesorze ARM. Wynika to z faktu, że współczesne układy elektroniczne cechują się coraz mniejszym zapotrzebowaniem na energię zasilającą przy jednoczesnym wzroście efektywności omówionych w artykule przetworników energii rozproszonej.

Przeprowadzone badania wykazały, że na chwilę obecną alternatywnymi źródłami zasilania charakteryzującymi się największym potencjałem są: układ pracujący w oparciu o zjawisko piezoelektryczne oraz układ termogeneratora. W obydwu przypadkach uzyskane wartości mocy mieściły się w zakresie 120-180 μ W.

Prace przeprowadzono w ramach międzynarodowej umowy zawartej pomiędzy Politechniką Łódzką, Laboratorium CEA-LITEN (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux) oraz firmą STMicroelectronics (Crolles2)SAS w oparciu o CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) no 0246/2012.

LITERATURA

- [1] Fagas G., Gammaitoni L., Paul D., Berini G.A., ICT – Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology, INTECH, 2014
- [2] Beeby S.P., Tudor M.J., White N.M., Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology*. IOP, Vol.17 R175–R195, 2006
- [3] Mateu L., Moll F., Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics, *Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium*, 2005
- [4] Hamilton M.C., Recent Advances in Energy Harvesting Technology and Techniques, 978-1-4673-2421-2/12, *IEEE*, 2012
- [5] Gilbert J.M., Balouchi F., Comparison of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Automation and Computing*, 05(4), 334-347, October 2008
- [6] Mitcheson P., Stark B., Yeatman P. E, Holmes A., Green T., Analysis and optimisation of MEMS on-chip power supply for self powering of slow moving sensors, *Proc. Eurosensors XVII*
- [7] Khaligh A., Zeng P., Wu X., Xu Y., Hybrid energy harvesting topology for human-powered mobile electronics, in *Proc. 34th Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Orlando, FL, 448-453, Nov. 2008
- [8] Kheng Tan Y., Sustainable Energy Harvesting Technologies - Past, Present and Future, *InTech* 2011
- [9] Khaligh A., Zeng P., Zheng C., Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, no. 3, March 2010
- [10] Salamon N., Gozdur R., Turczyński M., Lisik Z., Soupremanien U., Ollier E., Monfray S., Skotnicki T., Case study of piezoelectric flexible thin films in pulse excited electromechanical transducers, *Proceedings of SPIE Optics and Photoics*, Vol. 9291, ISSN: 0277-786X, 2014
- [11] Buren T., Lukowicz P., Troster G., Kinetic Energy Powered Computing - an Experimental Feasibility Study, *Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Wearable*

- Computers* (ISWC'03), 2003
- [12] Kymissis J., Kendall C., Paradiso J., Gershenfeld N., Parasitic power harvesting in shoes, in *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Wearable Comput.*, 132-139, 1998
- [13] Shenck N.S., A demonstration of useful electric energy generation from piezoceramics in a shoe, M. S. thesis, MIT, Cambridge, MA, 1999
- [14] Shenck N.S., Paradiso J.A., Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics, *IEEE Micro*, Vol. 21, no. 3, 30-42, May/June 2001
- [15] Bayrashev A., Robbins W.P., Ziaie B., Low frequency wireless powering of microsystems using piezoelectric-magnetostrictive laminate composites, *Sensors Actuators A* Vol.114, 244-249, 2004
- [16] Scherrer S., Plumlee D.G., Moll A.J., Energy scavenging device in LTCC materials, *IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices*, Proceedings of WMED, 77-78, 2005
- [17] Tashiro R., Kabei N., Katayama K., Tsuboi F., Tsuchiya K., 2002, Development of a electrostatic generator for cardiac pacemaker that harnesses the ventricular wall motion, *J. Artif. Organs* 239-45
- [18] Arakawa Y., Suzuki Y., Kasagi N., Micro seismic power generator using electret polymer, *Im Power MEMS Conference* (Kyoto, Japan), 187-90, 2004
- [19] Ongaro F., Saggini S., Corradini L., Low-Power Energy Harvester for Wiegand Transducers, *IEEE Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, 453-459, March 2013
- [20] Ramesh G.P., Rajan A., Microstrip Antenna Designs for RF Energy Harvesting, *International Conference on Communication and Signal Processing India*, April 3-5, 2014
- [21] Hong H., Tong S.J., Cai X., Shi X., Zhu X., Demonstration of a highly efficient RF energy harvester for Wi-Fi signals, *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) IEEE*, 2012
- [22] Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D., Solar cell efficiency tables (version 45), *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* vol. 23, 1, 1-9, 2015
- [23] Kayes B.M., Nie H., Twist R., Spruytte S.G., Reinhardt F., Kizilyalli I.C., Higashi G.S., 27.6% conversion efficiency, a new record for single-junction solar cells under 1 sun illumination, *Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2011
- [24] Nakamura M., Yamaguchi K., Chiba Y., Hakuma H., Kobayashi T., Nakada T., Achievement of 19.7% efficiency with a small-sized Cu(InGa)(SeS)₂ solar cells prepared by sulfurization after selenization process with Zn-based buffer, *39th IEEE PVSC*, Tampa, USA, June 18, 2013
- [25] Choi S., Sarabandi K., High Efficient Bowtie Nanoantenna For Thermophotovoltaic Cells, *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 146-147, IEEE, 2013

Autorzy: mgr inż. Natalia Salamon, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: salamon.natalia@o2.pl; mgr inż. Łukasz Bernacki, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: lukasz.bernacki@dokt.p.lodz.pl; dr inż. Roman Gozdur, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź; prof. dr hab. inż. Zbigniew Lisik, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: zbigniew.lisik@p.lodz.pl; prof. Thomas Skotnicki, STMicroelectronics (Crolles 2) SAS, 850 rue Jean Monnet, 38926 Crolles Cedex, France.