

Lasery półprzewodnikowe pompowane promieniowaniem słonecznym

Streszczenie. Niniejsza praca jest poświęcona analizie możliwości zastosowania promieniowania słonecznego do pompowania laserów półprzewodnikowych. Spośród wszystkich struktur tych laserów, najbardziej odpowiednie w takim zastosowaniu byłyby pompowane optycznie lasery VECSEL. Przykładów możliwych zastosowań takich laserów jest mnóstwo, jednakże najbardziej obecnie przydatne byłyby one w systemach optycznej łączności, zarówno na Ziemi, jak i w przestrzeni kosmicznej. Natomiast całkiem możliwym, choć nieco futurystycznym zastosowaniem takich laserów byłoby użycie ich do masowego przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

Abstract. In the present paper, an analysis of a possible application of the solar radiation for pumping of semiconductor lasers is presented. From among all structures of these lasers, optically pumped VECSEL lasers are the most applicable for such a pumping. There are very many possible applications of such lasers, they could be, however, the most useful in optical communication, both on the Earth or in the space. Besides, quite possible although somewhat futuristic application of such lasers could be in productive systems transferring solar energy into electrical power. (Direct solar pumping of semiconductor lasers).

Słowa kluczowe: pompowanie promieniowaniem słonecznym, lasery półprzewodnikowe, lasery VECSEL.

Keywords: Pumping by solar radiation, semiconductor lasers, VECSEL lasers.

Wprowadzenie

Obecnie trudno nawet wyobrazić sobie świat bez laserów, znalazły one powszechne zastosowanie prawie we wszystkich dziedzinach naszego codziennego życia. Jednakże poważnym problemem stojącym zawsze przed potencjonalnymi użytkownikami laserów jest konieczność ich odpowiedniego zasilania. Kłopoty z tym związane znacznie ograniczają obszar potencjalnych zastosowań tych przyrządów. Jednocześnie doskonale wiemy, że na Ziemię dociera ogromna ilość energii w postaci promieniowania słonecznego. Możliwość jego użycia do pompowania laserów, czyli praktycznie do uzyskania pożądanych źródeł światła laserowego nie wymagających zasilania, są ograniczone jedynie przez problemy techniczne i naszą wyobraźnię. Niniejsza praca jest poświęcona analizie perspektyw zastosowania światła słonecznego do pompowania laserów o najmniejszych rozmiarach, czyli laserów półprzewodnikowych.

Lasery półprzewodnikowe

Dwie główne klasy laserów półprzewodnikowych, tj. lasery o emisji krawędziowej (*edge-emitting lasers – EELs*) i lasery o emisji powierzchniowej, zwane najczęściej laserami z poprzecznym rezonatorem (*vertical-cavity surface-emitting lasers – VCSELs*), różnią się zasadniczo zarówno pod względem konstrukcyjnym, jak i pod względem własności eksploatacyjnych. Zaletą laserów EELs jest możliwość emisji promieniowania stosunkowo dużej mocy, zaś ich wadą – bardzo rozbieżna wiązka emitowanego promieniowania, zawierająca dużo modów podłużnych. Tych wad nie posiadają lasery VCSEL, w których rozbieżność wiązki promieniowania jest znikoma i zawiera ona jedynie podstawowy mod podłużny, natomiast ich istotną wadą jest znikoma moc emitowanego przez nie promieniowania.

Kilka lat temu pojawiła się zupełnie nowa klasa laserów półprzewodnikowych, mianowicie lasery z poprzecznym rezonatorem zewnętrznym (*vertical-external-cavity surface-emitting lasers – VECSELs*), cechujące się zarówno znakomitymi parametrami wiązki emitowanego promieniowania, jak i bardzo wysoką jego mocą. Jedyną ich wadą jest konieczność pompowania optycznego. Od pewnego czasu różne ośrodki naukowe próbują zastosować do pompowania laserów VECSEL

promieniowanie słoneczne, co znacznie poprawiłoby ich własności użytkowe. [1, 2].

Zastosowanie światła słonecznego do pompowania laserów półprzewodnikowych

Wspomniane w poprzednim rozdziale lasery zasilane promieniowaniem słonecznym można by było używać w dowolnym miejscu, również jako przenośne źródła światła laserowego, o ile tylko jest zapewniony dostęp do promieniowania naszego Słońca. Z oczywistych względów szczególnie przydatne w takim zastosowaniu są lasery półprzewodnikowe, a spośród różnych typów laserów półprzewodnikowych – najbardziej odpowiednie są z kolei te lasery, które z samej zasady swego działania korzystają z pompowania optycznego, czyli lasery VECSEL. Niniejsza praca jest poświęcona analizie możliwości pompowania laserów VECSEL (*vertical-external-cavity surface-emitting laser*) promieniowaniem słonecznym.

Ogromną zaletą laserów VECSEL pompowanych bezpośrednio światłem słonecznym (*solar-pumped VECSELs – SP-VECSELs*) jest możliwość ich stosowania bez żadnych źródeł zasilania, w każdych warunkach udostępniających światło słoneczne. Dzięki temu SP-VECSELs są znakomicie dobranymi laserami dla ich zastosowań w przestrzeni kosmicznej, gdzie o dostępności światła słonecznego decyduje jedynie system ciągłej korekcji ustawienia lasera śledzącego położenie Słońca, światło słoneczne nie jest niczym zasłaniane i jest dostępne cały czas niezależnie od pory dnia i pory roku, a dodatkowo można z pożytkiem wykorzystać ekstremalnie niską temperaturę przestrzeni kosmicznej.

Znacznie jednak szersze, zdecydowanie bardziej powszechne, rozmaite obszary zastosowań laserów SP-VECSEL są możliwe na Ziemi. Należałoby jednak wówczas dodatkowo uwzględnić absorpcję tego promieniowania w atmosferze, zmiany dobowe i roczne natężenia promieniowania słonecznego oraz możliwość jego przesłaniania przez różne obiekty latające. Ponadto takie lasery wymagałyby również systemu śledzącego przesuwania się Słońca na nieboskłonnie. Sposobność używania tych lekkich przyrządów o niewielkich rozmiarach w każdym miejscu oświetlanym jedynie światłem słonecznym bez konieczności zapewnienia zasilania wygeneruje prawdopodobnie wręcz niewyobrażalną różnorodność ich nowych możliwych zastosowań. Przyrządy te mogą się stać podstawowym wyposażeniem w bardzo

różnych sytuacjach. Obecnie nie jesteśmy nawet w stanie wyobrazić sobie tak różnych możliwych zastosowań tych przyrządów.

Ogniwa fotowoltaiczne przetwarzają promieniowanie, również promieniowanie słoneczne, na energię elektryczną. Pierwszy laser półprzewodnikowy zasilany matrycą ogniw fotowoltaicznych został wytworzony w 2013 roku [3]. Jednakże znacznie większe perspektywy ma bezpośrednie wykorzystanie promieniowania słonecznego do jego optycznego przetwarzania na promieniowania laserowe, tj. właśnie lasery półprzewodnikowe pompowane światłem słonecznym.

Lasery SP-VECSEL można wykorzystywać w różny sposób. Obecnie najbardziej obiecujące wydaje się ich zastosowanie jako źródeł fali nośnej w telekomunikacji optycznej oraz, być może w niedalekiej przyszłości, do przechwytywania, magazynowania i przesyłania energii słonecznej. W obu powyższych przypadkach lasery te mogą być użyte zarówno w przestrzeni kosmicznej, jak i na Ziemi, choć ich optymalne struktury dla obu tych zastosowań będą się nieco różnić. Oczywiście wyższość stosowania w przestrzeni kosmicznej laserów półprzewodnikowych nad innymi rodzajami laserów wynika z łatwości korzystania w kosmosie ze światła słonecznego, bez jego absorpcji w atmosferze ziemskiej i bez jego zasłaniania przez inne obiekty. Ponadto nie bez znaczenia są bardzo małe rozmiary laserów półprzewodnikowych, ich znikoma waga i niewielkie prądy progowe [4], a bardzo przydatny będzie łatwy dostęp do ekstremalnie niskiej temperatury otoczenia.

Lasery SP-VECSEL będą więc z pewnością stosowane w niezbyt odległej przyszłości w łączności zarówno między różnymi obiektami kosmicznymi, jak również między tymi obiektami i Ziemią. Jedynym problemem technicznym jest w tym przypadku konieczność wyposażenia laserów w układy optyczne śledzące przesuwanie Słońca na nieboskłonnie i ogniskujące jego promieniowanie na obszarze czynnym lasera. Natomiast zastosowanie tych laserów do przechwytywania, magazynowania i przesyłania na Ziemię energii promienistej, choć kuszące, byłoby obecnie dość kłopotliwe, gdyż wymagałoby utworzenia specjalnych izolowanych od otoczenia kanałów między laserami w kosmosie i Ziemią, aby przesyłana tymi kanałami ogromna energia nie stała się niebezpieczna dla ludzi, ptaków i zwierząt oraz samolotów i innych urządzeń. Będzie to przedmiotem następnego rozdziału.

Energetyczne zastosowanie laserów pompowanych światłem słonecznym

Dotychczasowe źródła energii coraz szybciej się wyczerpują. Potrzebny jest cały nowy system energetyczny składający się z obiektu wytwarzającego energię, sposobu jej skutecznego magazynowania, metody jej transportu oraz metody jej wykorzystania. Przewiduje się, że energetyczne potrzeby ludzi i przemysłu na kuli ziemskiej będą w roku 2050 ponad dwukrotnie, a w roku 2100 – ponad trzykrotnie wyższe niż obecnie [5]. Znalezione nowych źródeł energii staje się więc pilną potrzebą. Wydaje się, że wciąż w niedostatecznym stopniu wykorzystujemy energię promieniowania naszego Słońca. Przecież w ciągu jednej godziny dociera na Ziemię jako promieniowanie słoneczne więcej energii (około $4,3 \cdot 10^{20}$ J) niż cała energia konsumowana na Ziemi przez rok (około $4,1 \cdot 10^{20}$ J). [5]. Wiadomo więc skąd brać potrzebną energię, pozostaje natomiast problemem – jak to zrobić.

Jedną z możliwości wytwarzania i transportu energii przy wykorzystaniu promieniowania słonecznego jest użycie w tym celu laserów. Już w 1966 roku donoszono o pierwszym laserze zasilanym światłem słonecznym [6].

Obecnie w tym celu stosuje się najczęściej lasery typu Nd:YAG lub Nd:Cr:YAG. Na przykład niezwykle obiecujący system MAGIC (*MAGnesium Injection Cycle*) wykorzystujący energię słoneczną został zaprezentowany w Tokyo Institute of Technology [5, 7]. Laser pompowany światłem słonecznym został w tym systemie wykorzystany do wytworzenia z wody morskiej tlenku magnezu, który w postaci proszku może być transportowany do miejsca magazynowania, a następnie stosowania. Powyższy proszek może być bezpośrednio spalany, wytwarzając ciepło i wodór. System ten jest wielokrotnie wydajniejszy niż bezpośrednie stosowanie wodoru, a poza tym jest znacznie bezpieczniejszy – nie grozi wybuchem.

Najbardziej odpowiednimi przyrządami do przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię użyteczną wydają się lasery półprzewodnikowe, a spośród nich – pompowane optycznie lasery SP-VECSEL [8]. O możliwości takiego zastosowania laserów półprzewodnikowych sygnalizował już w 1994 roku Landis [2]. Według tego autora, moce nawet rzędu megawatów mogłyby być uzyskiwane przez matryce dziesiątków tysięcy laserów absorbujących promieniowanie słoneczne z obszarów 0,5 m x 0,5 m, co wydawało się już wówczas, tj. w 1994 roku, technicznie wykonalne.

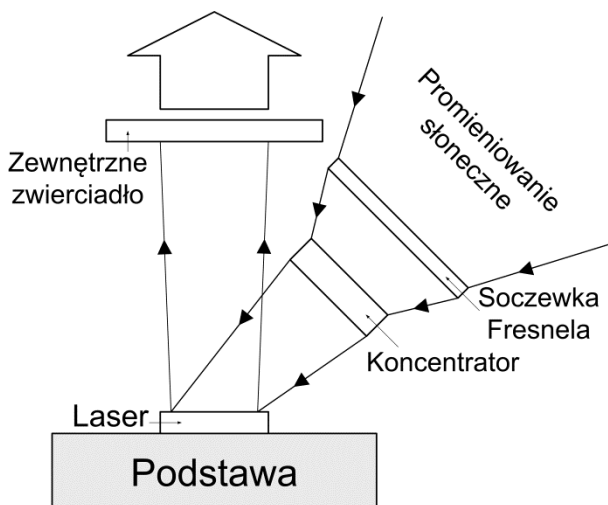
Koncentrowanie promieniowania słonecznego

Całkowita gęstość promieniowania słonecznego na poziomie zero (tj. poza ziemską atmosferą), tzw. *AM0 air-mass-zero solar spectrum*, wynosi $135,3 \text{ mW/cm}^2$ [3], a spectrum jego energii odpowiada w przybliżeniu promieniowaniu ciała doskonale czarnego o temperaturze 5800 K [4]. Jednakże na powierzchni Ziemi użyteczna gęstość tego promieniowania zależy od pory roku [9], pory dnia, a również od możliwości zasłaniania Słońca przez różne obiekty oraz od czystości powietrza. Przyjmuje się, że użyteczna gęstość promieniowania osiągniętego powierzchnią Ziemi nie jest wyższa od 70 mW/cm^2 [10].

W przypadku laserów SP-VECSEL energia absorbowanego światła musi być większa od przerwy energetycznej, co dodatkowo ogranicza możliwą do wykorzystania energię pompującego promieniowania słonecznego – przyjmuje się, że można będzie wykorzystać od połowy do trzech czwartych tej energii [5]. W przypadku obszaru absorbującego promieniowanie wykonanego z GaAs, jego przerwa energetyczna wynosi mniej więcej 1,4 eV. Wówczas, przyjmując całkowitą absorpcję promieniowania słonecznego AM0 oraz jego skupienie 2500 razy, uzyskana tą metodą gęstość par elektron-dziura będzie odpowiadała wstrzyknięciu prądu o gęstości jedynie około 100 A/cm^2 . Dla zasilania lasera półprzewodnikowego jest to wielkość nieakceptowalnie mała. Dlatego dla jego wzbudzenia promieniowaniem słonecznym gęstość tego promieniowania powinna być bardziej skoncentrowana.

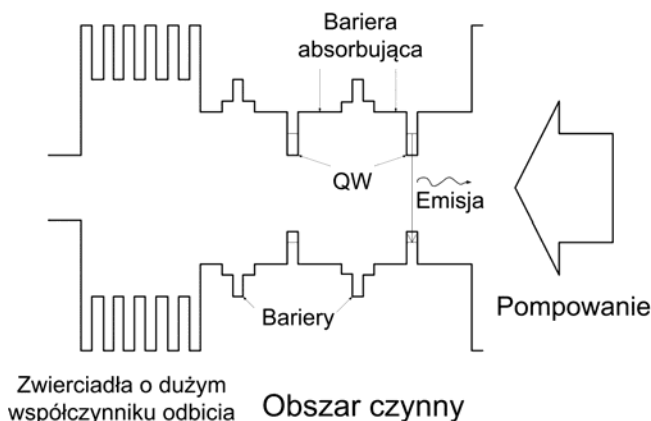
Typowy układ lasera SP-VECSEL jest pokazany na rysunku 1, a model pasmowy jego obszaru czynnego – na rysunku 2. Do skupienia promieniowania słonecznego w obszarze czynnym tego lasera została wykorzystana soczewka Fresnela oraz specjalny koncentrator, o którym będzie mowa poniżej. Promieniowanie skoncentrowane przez ten układ optyczny w obszarze czynnym lasera SP-VECSEL jest absorbowane w barierach absorbujących (rys. 2). Nośniki, będące wynikiem tej absorpcji, tj. elektrony w paśmie przewodnictwa i dziury w paśmie walencyjnym obszaru czynnego, są następnie wstrzykiwane do studni kwantowych QWs, gdzie szybko ulegają emisji stymulowanej. Promieniowanie słoneczne, które podczas tego procesu nie zostanie zaabsorbowane, będzie odbite przez tylne zwierciadło o wysokim współczynniku odbicia i ponownie może być absorbowane w barierach

absorbujących. Rezonator lasera SP-VECSEL jest utworzony przez powyżej wspomniane zwierciadło oraz znajdujące się w pewnej odległości od obszaru czynnego górne zwierciadło półprzepuszczalne (rys. 1), przez które następuje emisja promieniowania użytecznego.



Rys. 1. Typowy układ lasera SP-VECSEL wykorzystującego do skupienia promieniowania słonecznego soczewkę Fresnela i koncentrador CPC bądź DTIRC

Jak z powyższych danych widać, sporym problemem dla wzbudzenia promieniowaniem słonecznym laserów SP-VECSEL jest konieczność skupienia tego promieniowania do gęstości wystarczającej do osiągnięcia progu akcji laserowej. Ocenia się, że w przypadku tych laserów, wymagana gęstość promieniowania wynosi około 2000 W/cm^2 zależnie od procesów wzmacniania promieniowania i jego strat [11, 12]. Wynika z tego, że, dla osiągnięcia progu akcji laserowej, promieniowanie słoneczne powinno być skoncentrowane co najmniej 30 tysięcy razy, a po uwzględnieniu problemów termodynamicznych, nawet około 50 tysięcy razy [8]. Najbardziej odpowiednie do tego celu są przyrządy optyki nieobrazowej (*nonimaging optics*), zapewniające wykorzystanie największych kątów odbioru promieniowania (*acceptance angle*) oraz możliwość skupienia promieniowania o w przybliżeniu stałym natężeniu do obszarów o średnicach rzędu milimetra.



Rys. 2. Model pasmowy typowego obszaru czynnego lasera SP-VECSEL. QWs – studnie kwantowe (na podstawie Fig. 3 w [13])

W przypadku laserów SP-VECSEL, mamy obecnie do dyspozycji dwa odpowiednie koncentratory: złożony koncentrador paraboliczny (*compound parabolic concentrator*

– CPC) [14] i dielektryczny koncentrador całkowicie wewnątrz odbijający (*dielectric totally internally reflecting concentrator* – DTIRC) [15]. Dotychczas największą koncentrację wynoszącą 84 tysięcy razy, a więc, zgodnie z powyższą analizą, wystarczającą dla wzbudzenia wydajnego promieniowania laserowego, uzyskano w tym drugim koncentracji [16]. Uważa się, że obydwie powyższe koncentratory są geometrycznie odpowiednie do pompowania laserów SP-VECSEL, wytwarzając w przybliżeniu stałą koncentrację pompującego promieniowania wewnątrz kołowego obszaru o typowej średnicy około 1 mm.

D. Cooke [16] zaproponował dwuetapowy system koncentracji promieniowania słonecznego, w którym w pierwszej paraboliczne zwierciadło ogniskuje to promieniowanie w aperturze wejściowej systemu *nonimaging optics*, który to system następnie koncentruje je do wymaganej dla lasera SP-VECSEL gęstości promieniowania. Moc użytecznego promieniowania skoncentrowanego przy użyciu szklanego ($n_R = 1,5$) *nonimaging concentrator* do odpowiednio małego przekroju wynosi około 5,7 W.

Podsumowanie

Do tej pory wykorzystywaliśmy docierające do Ziemi promieniowanie słoneczne jedynie w bardzo niewielkim stopniu. To się z pewnością zmieni już w najbliższej przyszłości. Oczekuje się, że zostanie skonstruowanych ogromna ilość przyrządów korzystających bezpośrednio z promieniowania słonecznego, czyli w praktyce nie wymagających źródeł zasilania pod warunkiem udostępnienia dla nich promieniowania naszego Słońca. Jednymi z pierwszych takich przyrządów mogą być zasilane promieniowaniem słonecznym lasery półprzewodnikowe, najpewniej - pompowane optycznie lasery SP-VECSEL. Właściwie jedynym obecnie problemem pozostającym jeszcze do rozwiązania przed ich masowym zastosowaniem jest skonstruowanie takich systemów koncentrujących promieniowanie słoneczne, aby gęstość ich skoncentrowanego promieniowania przewyższała gęstość progową laserów. I tego właśnie należy oczekiwać w najbliższym czasie.

Druga z ważnych możliwości aplikacyjnych zastosowania światła słonecznego do pompowania laserów półprzewodnikowych będzie wymagała bardziej skomplikowanych przygotowań. Chodzi mianowicie o skupienie w jednym miejscu ogromnej liczby laserów pompowanych światłem słonecznym jako wydajnych źródeł energii elektrycznej. Analogicznie do już znanych źródeł wykorzystujących pola ogromnej ilości ogniw fotowoltaicznych. Jednakże użycie w ich miejsce laserów SP-VECSEL wydaje się mieć znacznie większe perspektywy.

Autor: prof. dr hab. inż. Włodzimierz Nakwaski, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, Zespół Fotoniki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, E-mail: wlodzimierz.nakwaski@p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] Tsidulko I.M., Semiconductor laser pumped by solar radiation, *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 22, No 5 463-466, May 1992
- [2] Landis G.A., Prospects for solar pumped semiconductor lasers, *Proc. SPIE*, vol. 2121 (1994), 58-65
- [3] Johnson S., Küppers F., and Pau S., Efficiency of continuous-wave solar pumped semiconductor lasers, *Optics and Laser Technology*, vol. 47 (2013), 194-198
- [4] Unnikrishnan S. and Anderson N.G., Quantum-well lasers for direct solar photopumping, *J. Appl. Phys.*, vol. 74, (1993), No 6, 4221-4228
- [5] Yabe T., Bagheri B., Ohkubo T., Uchida S., Yoshida K., Funatsu T., Oishi T., Daito K., Ishioka M., Yasunaga N., Sato Y., Baasandash C., Okamoto Y., and Yanagitani K., 100 W-

- class solar pumped laser for sustainable magnesium-hydrogen energy cycle, *J. Appl. Phys.*, vol. 104, (2008), 083104
- [6] Young C.W., A sun-pumped cw one-watt laser, *Appl. Opt.*, vol. 5, (1966), 993-997
- [7] Yabe T., Uchida S., Ikuta K., Yoshida K., Baasandash C., Mohamed M.S., Sakurai Y., Ogata Y., Tuji M., Mori Y., Satoh Y., Ohkubo T., Murahara M., Ikesue A., Nakatsuka M., Saiki T., Motokoshi S., and Yamanaka C., Demonstrated fossil-fuel-free energy cycle using magnesium and laser, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, (2006), 261107
- [8] Quarterman A.H. and Wilcox K.G., Design of a solar-pumped semiconductor laser, *Optica*, vol. 2, No 1 56-61, Jan. 2015
- [9] Abdel-Hadi Y.A., Development of optical concentrator systems for directly solar pumped laser system, Mensch und Buch Verlag, Berlin, Germany (2006)
- [10] Seregin A.A. and Seregina E.A., Solar-pumped ground-based pulsed liquid laser, *Laser Physics*, vol. 15, (2015), No 3, 401-404
- [11] Heinen B., Wang T.-L., Sparenberg M., Weber A., Kunert B., Hader J., Koch S.W., Moloney J.V., Koch M., and Stolz W., 106 W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser, *Electron. Lett.*, vol. 48, (2012), 516-517
- [12] Wang T.-L., Kaneda Y., Yarborough J.M., Hader J., Moloney J.V., Chernikov A., Chatterjee S., Koch S.W., Kunert B., and Stolz W., High-power optically pumped semiconductor laser at 1040 nm, *IEEE Photon. Techn. Lett.*, vol. 22, (2010), 661-663
- [13] He Y., Xiong S., Liu X., and Han W., Key techniques for space-based solar-pumped semiconductor lasers, *Proc. SPIE*, vol. 9294, 2014
- [13] Winston R., Light collection within the framework of geometrical optics, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 60, (1970), 245-247
- [14] Ning X., Winston R., and O'Gallagher J., Dielectric totally internally reflecting concentrators, *Appl. Opt.*, vol. 26, (1987), 300-305
- [15] Cooke D., Sun-pumped lasers: revisiting an old problem with nonimaging optics, *Appl. Opt.*, vol. 31, (1992), 7541-7546

