

Prof. dr Mieczysław SUBOTOWICZ

Kryzys energetyczny

Użytkowane na Ziemi tradycyjne źródła energii, jak węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny i torf, zostały nagromadzone na Ziemi przez ubiegłe setki milionów lat w rezultacie oddziaływania promieniowania słonecznego z pierwotną atmosferą Ziemi i w procesach fotosyntezy w roślinach zielonych. Nowsze źródło energii w postaci pierwiastków rozszczepialnych stanowi zapewne ślad przejścia gazów i pyłów, z których uformowało się Słońce i Układ Planetarny, przez obłok materii wyrzuconej w przestrzeń w rezultacie wybuchu jednej lub kilku gwiazd supernowych. W takim tygłu bowiem wytwarzane są pierwiastki z końca tablicy Mendelejewa. Roczna światowa produkcja energii elektrycznej wynosiła w r. 1970 około jednego miliarda kW tj. 10^9 GW (gigawatów; $1 \text{ GW} = 10^9$ watów). Przy wzroście spożycia energii elektrycznej wynoszącym 5,5% do 6% rocznie, produkcja energii w roku 2000 powinna wynieść 5 do 6 tysięcy GW. W ciągu najbliższych 25—30 lat musi nastąpić więc 5-6-krotny wzrost produkcji energii w porównaniu z rokiem 1970. Tak dużego zapotrzebowania nie zaspokoją paliwa kopalne, zarówno z powodów technicznych, ekologicznych, jak i społeczno-politycznych. Zdobywanie nowych źródeł energii staje się już czołowym zadaniem nauki, techniki i polityki.

Wydajne źródła energii

Widzimy obecnie trzy nie-kopalne źródła energii, które mogą zasadniczo rozwiązać problem zapotrzebowania na energię elektryczną na Ziemi. Są to źródła energii jądrowej, pochodzącej z rozszczepienia jąder atomowych i z procesów syntezy jądrowej, geotermicznej i słonecznej. Do najbardziej prawdopodobnych sposobów realizacji procesu syntezy jądrowej należą: 1) sprężanie i ogrzewanie plazmy w toroidalnych reaktorach typu „Tokamak”, opracowanych najpierw w zespole fizyka radzieckiego, Lwa Arcimowicza, 2) ogrzewanie plazmy za pomocą współśrodkowych wiązek laserowych, metodą zaproponowaną przez Basowa (ZSRR) oraz Dawsona (USA). Metody te zostały omówione wcześniej na łamach „Delt” (patrz „Delta” 3/1975). Każda z nich znajduje się obecnie na etapie poznawania podstawowych procesów fizycznych. Ich przemysłowe zastosowania przewidywane są dopiero na pierwsze lata XXI wieku. Ponadto istnieją możliwości wytwarzania dużej mocy przez wykorzystanie innego, praktycznie nieograniczonego źródła energii, jakim jest Słońce. Realizacja tego celu metodami techniki kosmicznej wymaga wrzęgnięcia wielu dziedzin naukowo-technicznych, na czele z fizyką ciała stałego, elektroniką i całym zespołem dyscyplin naukowo-technicznych. Możliwe byłyby tu dwa warianty: słoneczna elektrownia satelitarna (SES) oraz satelitarne przekaźniki energii (SPE) do przesyłania do różnych miejsc na Ziemi energii elektrycznej, wytworzonej na Ziemi i pochodzącej ze Słońca lub z procesów jądrowych.

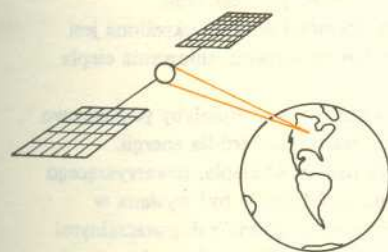
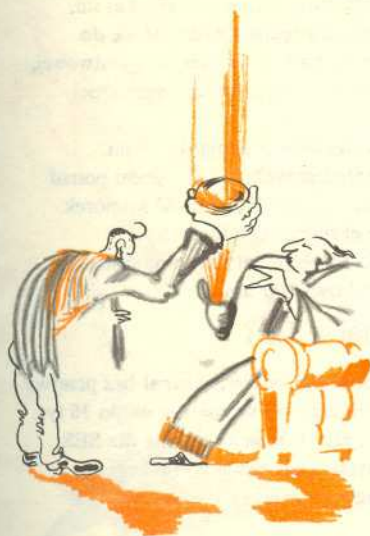
Wykorzystanie energii słonecznej

Składowi widmowemu i natężeniu promieniowania słonecznego powyżej atmosfery ziemskiej odpowiada moc $1,39 \text{ kW/m}^2$, na poziomie morza zaś — 1 kW/m^2 , czyli ponad atmosferą natężenie jest 1,4 razy większe od natężenia przy powierzchni Ziemi. Energia słoneczna może być przekształcona na elektryczną w kilku procesach elementarnych: termojonowym, termoelektrycznym, termodynamicznym i fotowoltaicznym. W niniejszym artykule zajmujemy się w szczególności zjawiskiem fotowoltaicznym, czyli zamianą energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

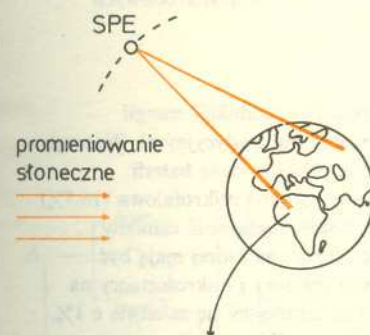
Zjawisko fotowoltaiczne i elementy fotowoltaiczne

Przykładem zastosowania półprzewodnikowych elementów fotowoltaicznych są światłomierze lub zasilacze aparatury elektronicznej na większości sond kosmicznych. Zamiana energii promieniowania elektromagnetycznego Słońca na energię elektryczną stanowi treść zjawiska fotowoltaicznego. Zjawisko to obserwujemy w warunkach, gdy zachodzi:

- 1) wytwarzanie przez promieniowanie słoneczne dodatkowych nośników prądu obu znaków (elektronów i dziur), zdolnych do poruszania się w elemencie fotowoltaicznym,
 - 2) rozdzielanie tych nośników na barierach potencjału w złączach p-n, heterozłączach, na kontakcie metal-półprzewodnik itp.,
- a ponadto gdy czas życia nośników prądu po ich wytworzeniu przez promieniowanie wystarcza na to, by mogły one dojść do bariery, powodującej ich rozdzielanie. Wymienione w 2) struktury umożliwiają budowę elementów fotowoltaicznych o wysokiej sprawności i stabilności działania. Złącza p-n są wytwarzane z półprzewodników grupy IV (Ge i Si), ze związków półprzewodnikowych $A^{III}-V^V$ (GaAs, InP, AlSb itp.), $A^{II}-B^{VI}$ (CdTe i ZnTe) oraz pewnych związków trójskładnikowych, jak CuInS_2 i kilku innych.

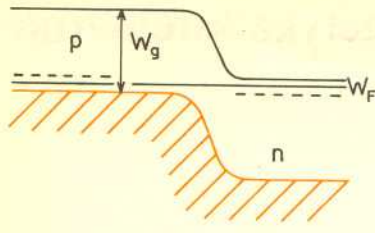


Koncepcja słonecznej elektrowni satelitarnej (SES)

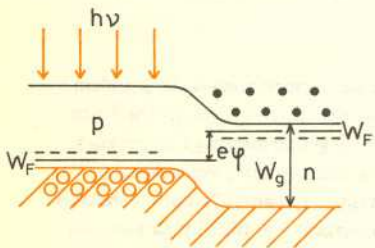


naziemna elektrownia słoneczna tace baterii fotowoltaicznych

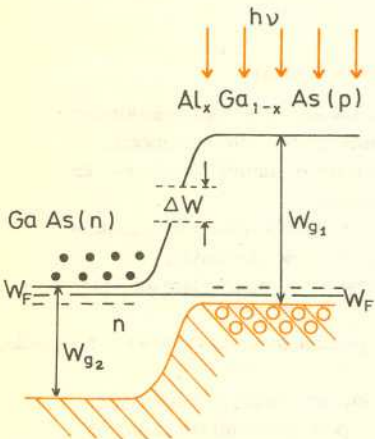
Koncepcja satelitarnego przekaźnika energii (SPE)



a) Homozłącze p-n w stanie równowagi bez oświetlenia



b) Homozłącze p-n jako element fotowoltaiczny w stanie równowagi z padającym promieniowaniem; φ — napięcie fotowoltaiczne na pojedynczej komórce fotoelektrycznej



c) Heterozłącze p-n w stanie równowagi

W złączach Si(p-n) oraz GaAs z cienką warstwą $Al_xGa_{1-x}As$ uzyskano sprawność zamiany energii, odpowiednio 15% i 18%. Heterozłącza tworzymy z półprzewodników „p” i „n” o zbliżonych stałych sieci, na przykład CuS(p) — CdS(n). Do budowy elementów fotowoltaicznych należy używać półprzewodników o szerokości przerwy energetycznej W_g w przedziale $1,0 < W_g < 2,5$ eV. Maksymalną sprawność konwersji η_{max} w zależności od W_g oszacowano dla złącza idealnego na około 24% (dla Al-Sb i CdTe), dla złącza z wytwarzaniem nośników i rekombinacją w obszarze ładunku przestrzennego — na około 16% ($GaAs(n) — Al_xGa_{1-x}As(p)$). Praktycznie uzyskano $\eta_{max} = 12\%$ (Si), $\eta_{max} = 4\%$ (CdTe) itd. Materiały do budowy fotoogniów powinny być stosunkowo łatwo dostępne i nadawać się do taniej, szybkiej i masowej obróbki przemysłowej, opartej zapewne na technice cienkowarstwowej, jeżeli tylko baterie fotowoltaiczne mają stać się głównym narzędziem satelitarnej i naziemnej energetyki słonecznej.

W dotychczasowych programach kosmicznych elementy fotowoltaiczne pracują do 10 lat. Postulowany czas bezawaryjny pracy słonecznych elektrowni satelitarnych (SES) wynosi ponad 30 lat. Dla uzyskania sprawności baterii fotowoltaicznej równej 1,5 kg/kW, grubość komórek fotowoltaicznych powinna wynosić 50 μm . Budowane obecnie eksperymentalne baterie fotowoltaiczne mają sprawność 4,5 kg/kW. Budowane ostatnio fotoelementy przeznaczone do satelitów komunikacyjnych osiągnęły sprawność 16 % przy grubości 200 μm .

Koncepcja słonecznej elektrowni satelitarnej (SES)

W porównaniu z Ziemią SES na orbicie synchronicznej (stacjonarnej) odbiera niemal bez przerwy w sumie 6 do 15 razy więcej energii niż Ziemia. Orbita synchroniczna na wysokości około 36 tys. km ponad powierzchnią Ziemi i w płaszczyźnie jej równika jest szczególnie korzystna dla SES z powodu nieważkości, braku wiatrów i opadów atmosferycznych. Umożliwia to budowę struktur o minimalnej masie i pozwala obniżyć ilość zużywanego materiału na jednostkę uzyskiwanej mocy.

Tak więc energia słoneczna byłaby przetwarzana na stacjonarnej orbicie satelitarnej na energię elektryczną (za pomocą ogniw fotowoltaicznych), ta zaś — na promieniowanie mikrofalowe (za pomocą klistronów bądź magnetronów), które przez satelitarą antenę nadawczą byłoby przesyłane na Ziemię z odległości 36 tysięcy km i odbierane przez antenę naziemną. Tu łatwo przetworzyć energię promieniowania mikrofalowego z powrotem na energię prądu stałego i następnie — zmiennego. Lokalizacja odbiorczej elektrowni naziemnej byłaby w zasadzie dowolna.

W próżni kosmicznej generatory mikrofalowe oraz inne elementy mogą pracować otwarte (na Ziemi trzeba je odpompowywać). Wiązkę mikrofalową można stosunkowo łatwo skierować do anteny odbiorczej, którą można ulokować na terenach o mniejszej wartości użytkowej i w pobliżu odbiorcy energii.

SES są przewidziane do wytwarzania dużej mocy od 2 do 20 GW. Powierzchnia tac fotowoltaicznych do zbierania promieniowania słonecznego wynosić będzie wiele dziesiątków km^2 , zależnie od projektowanej mocy. Dolna granica mocy określana jest relacjami geometrycznymi między anteną nadawczą i odbiorczą. Górna granica (20 GW) określona jest pojemnością cieplną generatorów mikrofalowych i zdolnością ich do wypromieniowania ciepła w przestrzeń przy zadanym stosunku mocy do masy.

Rozmieszczone na orbitach satelitarnych liczne elektrownie słoneczne uzupełniałyby początkowo potrzeby energetyczne Ziemi, później — zastąpiłyby całkowicie tradycyjne źródła energii.

Przypuszczalny wpływ na środowisko byłby niewielki, gdyż większość ciepła, towarzyszącego konwersji energii promienistej na elektryczną i wytwarzaniu mikrofal, może być wysłana w przestrzeń kosmiczną. Wiązka mikrofalowa może mieć gęstość mocy, zgodną z dopuszczalnymi normami międzynarodowymi. Moc promieniowania mikrofalowego na Ziemi nie może przekraczać ustalonego poziomu ani wywoływać ujemnych skutków biologicznych, oraz powinna być przesyłana z dużą wydajnością za pomocą znanych urządzeń. Najkorzystniej to zrobić w obszarze długości fali $\lambda = 10$ cm, gdyż wtedy zakłócenia nie naruszają międzynarodowych ustaleń o podziale częstotliwości.

Problematyka techniczna i koszty

Powodzenie budowy SES zależeć będzie od konkurencyjności kosztów produkcji energii elektrycznej metodami energetyki satelitarnej w porównaniu z metodami tradycyjnymi. Wymaga to optymalizacji wielu parametrów SES. Masa SES jest określona głównie masą baterii fotowoltaicznych, które stanowią 83,3% masy SES, resztę stanowią: antena mikrofalowa (16,5%) oraz system kontroli (0,2%). Ceny fotoelementów powinny być niskie, wydajność zamiany energii promienistej na elektryczną — duża, masa fotokomórek i ramy, na której mają być rozmieszczone tace fotowoltaiczne — mała. Zagrożenie SES przez meteory i mikrometeory na orbicie synchronicznej nie będzie duże: w ciągu 30 lat moc średnio zmniejszy się zaledwie o 1%. Dla fali o długości $\lambda = 10$ cm (częstość $\nu = 3$ GHz) średnica anteny odbiorczej D powinna wynosić około 10 km, zatem jej powierzchnia przy wiązkę o przekroju kwadratowym musi wynosić około 100 km^2 . Antenę nadawczą ma stanowić płaski układ o średnicy około 1 km, zbudowany z aluminium lub stopów o masie około $6 \cdot 10^6$ kg. Na stacji nadawczej będzie się znajdować 16 milionów anten śrubowych lub falowodów szczelinowych na 1 km^2 wraz

Nagrodę — książeczki „Biblioteczki Matematycznej” — otrzymuje Danuta Rymkiewicz z Gdyni, która opisała dwa ptaszki.



z urządzeniami do przesuwania fazy i koncentrowania wiązki na antenie odbiorczej, utworzonej z elementów dipolowych, podłączonych do diod, przekształcających energię mikrofalową w energię prądu stałego. Liczba elementów dipolowych przekroczy 1,5 miliarda. Rozkład natężenia promieniowania mikrofalowego w wiązce musi być gaussowski, a front fazowy fali — zogniskowany na antenie odbiorczej, co wymaga bardzo starannego kontrolowania fazy emitowanej fali z dokładnością do 0,04 sekundy łuku.

Transport SES na orbitę synchroniczną oraz montaż wszystkiego (rama, tace fotowoltaiczne, układ do zamiany energii elektrycznej na promieniowanie mikrofalowe) w jeden pracujący zespół SES stanowi najtrudniejszy problem techniczny i określa główną część kosztów budowy SES obok kosztów elementów fotowoltaicznych. Koncepcja transportu i gabaryty poszczególnych modułów zakładają wykorzystanie budowanego obecnie w USA wahadłowca (około 100 lotów jednej maszyny na trasie: Ziemia — orbita satelitarna i z powrotem). Masa ładunku użytecznego wynosi w wahadłowcu 30 ton, koszty transportu — 150\$/kg. Ustawienie jednej SES będzie wymagało 150 lotów. Budowa SES ma być dwustopniowa: a) tani transport dużych ładunków na bliską Ziemi orbitę satelitarną, b) transport częściowo zmontowanych części SES na orbitę synchroniczną, gdzie nastąpi zakończenie montażu.

Koszty prototypowej SES mają wynosić od 1600 do 2500 \$/kW, co jest porównywalne z kosztami prototypów konkurencyjnych urządzeń produkujących energię. Rozkład tych kosztów między poszczególne części i fazy budowy SES jest następujący (dane dotyczą SES, dostarczającej na Ziemię moc 750 MW): baterie fotowoltaiczne — 350 \$/kW, transport na orbitę synchroniczną — 1000 \$/kW, generator mikrofalowy i antena nadawcza — 150 \$/kW, antena odbiorcza na Ziemi — 100 \$/kW; łącznie ~ 1600 \$/kW.

Sugerowane są następujące parametry docelowe SES: transport i montaż — 200 \$/kg, produkcja mocy — 350 \$/kg, masa właściwa urządzenia — 1 kg/kW, wydajność konwersji fotoelektrycznej — 14—18%, wydajność reszty układu — 60%, czas montażu — 3 lata, koszty produkcji energii — 4,5 cent/kWh (wartość dolara z r. 1973).

Należałoby jeszcze uwzględnić skutki budowy SES ze względu na środowisko, bezpieczeństwo, potrzeby energetyczne podczas trwania budowy SES, skutki demograficzne, wytwarzanie nieużytecznego ciepła na Ziemi przy zamianie energii promieniowania mikrofalowego na prąd elektryczny, zajęcie terenu pod antenę odbiorczą. Naświetlenie promieniowaniem mikrofalowym w odległości 10 km od środka spójnej wiązki winno być poniżej tolerancyjnej normy międzynarodowej (w USA — 10 mW/cm²). Gdy wiązka nie jest spójna, energia ulega rozproszeniu do poziomu ziemskich sygnałów łącznościowych. Efekt działania na samoloty i ptaki, które znajdują się w wiązce, jest do zaniedbania.



Zadania

Redaguje mgr Andrzej MAKOWSKI

M 127. Czy istnieje funkcja okresowa $f: R \rightarrow R$, która nie jest funkcją stałą i której okresami są liczby 1 i $\sqrt{2}$?

W. Mnich

Rozwiązanie na str. 8

M 128. Udowodnić, że jeżeli a_1, a_2, \dots, a_n są różnymi liczbami całkowitymi, to wielomian

$$(x - a_1)(x - a_2) \dots (x - a_n) - 1$$

nie jest iloczynem dwóch wielomianów o współczynnikach całkowitych stopnia mniejszego od n .
Rozwiązanie na str. 9

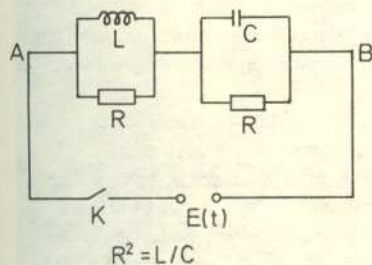
M 129. W turnieju ping-ponga, w którym każdy zawodnik grał z każdym, uczestniczyli zawodnicy amerykańscy i chińscy. Po zakończeniu turnieju okazało się, że każdy uczestnik połowę uzyskanych punktów zdobył grając z zawodnikami chińskimi (za zwycięstwo zawodnik otrzymuje 1 punkt, za przegraną 0). Udowodnić, że liczba wszystkich uczestników turnieju jest kwadratem liczby naturalnej.

Rozwiązanie na str. 14

Redaguje dr Waldemar GORZKOWSKI

F 43. Z dwóch oporników, cewki, kondensatora, klucza i źródła prądu zbudowano układ taki, jak na rysunku. Wykaż, że jeżeli $R^2 = L/C$, to niezależnie od tego, jak siła elektromotoryczna źródła zmienia się w czasie, część obwodu między punktami A i B po włączeniu klucza K zachowuje się jak opór omowy. Wyznacz wartość tego oporu.

Rozwiązanie na str. 4



$$R^2 = L/C$$