

14k-1,82

DR H. Kruczek

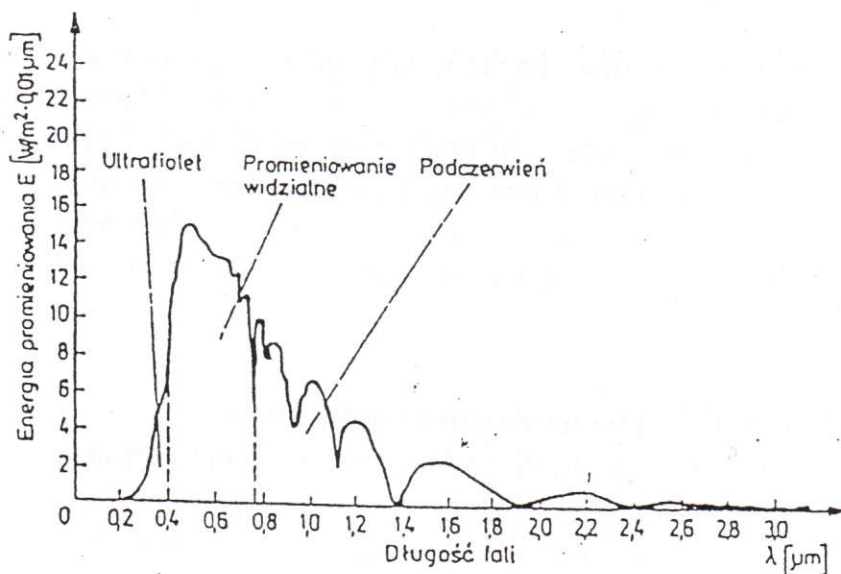
OGNIWO FOTOWOLTAICZNE

OF
BS

SŁOŃCE — ENERGIA DO WZIĘCIA

Energia słoneczna jest w rzeczywistości energią reakcji termojądrowych zachodzących w olbrzymiej odległości od Ziemi. Zachodzące na Słońcu przemiany helu w wodór i odwrotnie dają w efekcie energetyczne promieniowanie elektromagnetyczne, wysyłane z powierzchni gwiazdy. Jest ona gigantyczną termojądrową bombą, eksplodującą bezustannie w temperaturze setek milionów stopni. Długość fali promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni Ziemi mieści się w przedziale 0,2 — 3,0 mikrometrów. Widmo promieniowania słonecznego nie jest energetycznie jednorodne. Jego energia zmienia się znacznie w zależności od długości fali promieniowania. Krzywa zależność energii E od długości fali λ jest po prostu postrzępiona (rys. 1).

Do wykorzystania w praktyce energii Słońca konieczne jest określenie jej gęstości, rozumianej jako uśredniona moc promieniowania przypadająca



Rys. 1.
Krzywa zależności energii promieniowania słonecznego E od długości fali λ .

jąca na metr kwadratowy powierzchni. Odnosząc energię promieniowania do długości fali, czyli tworząc funkcję ilorazu $E(\lambda)$ można łatwo wyznaczyć na powierzchni prostopadłej do kierunku promieniowania jego moc (lub inaczej gęstość)

$$J_{oe} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda$$

Stąd na wykresie rysunku 1 na osi pionowej wartość mocy promieniowania jest wyrażona w watach na metr kwadratowy oraz na porcję fali zawartą w jednej setnej mikrometra.

Z obliczeń wynika, że na powierzchni prostopadłej do promieni słonecznych ich moc dla zakresu zmian długości fali od zera do nieskończoności wynosi około 1353 watów na metr kwadratowy ponad atmosferą Ziemi oraz około 1000 watów na metr kwadratowy na poziomie morza. Należy oczywiście podkreślić, że wykorzystanie tej mocy zależy od warunków zewnętrznych, na przykład od temperatury otoczenia, a więc jest różne dla poszczególnych stref klimatycznych i geograficznych globu.

Omawiając potencjalne wykorzystanie mocy promieniowania słonecznego trudno oprzeć się zacytowaniu następującego przykładu: na jeden kilometr kwadratowy powierzchni prostopadłej do kierunku promieni przypada gęstość energii słońca równa 1000 kilowatów czyli 1 megawatowi.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły powierzchni prostopadłej do promieniowania słonecznego. W rzeczywistości, na skutek ruchu Ziemi, na jej powierzchnię pada strumień promieni Słońca pod kątem zależnym od pory dnia i roku. Pierwszą zależność można określić w stosunku do gęstości energii J_o za pomocą funkcji cosinusoidalnej

$$J_e = J_{eo} \cos \alpha$$

gdzie α — kąt odchylenia promieni słonecznych od kierunku prostopadłego.

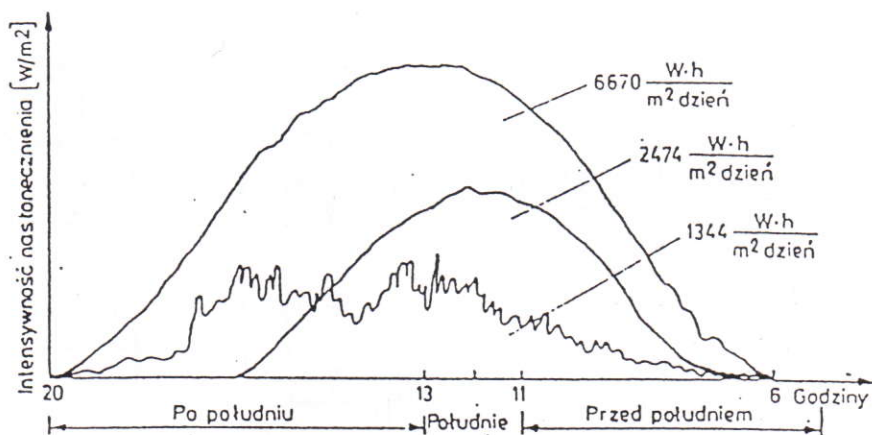
Ta zależność jest słuszna wyłącznie dla równika, gdy w południe słońce świeci prostopadle do powierzchni Ziemi. Dla innych szerokości geograficznych cytowany wzór wymaga wprowadzenia poprawki. Stałe odchylenie promieni słonecznych od kierunku prostopadłego w południe decyduje o gęstości energii słonecznej. Oznaczając przez Θ kąt szerokości geograficznej można gęstość energii słonecznej opisać za pomocą zależności

$$J_e = J_{eo} \cos \alpha \cos \Theta$$

gdzie $\cos \Theta$ — wartość stała dla określonego punktu globu.

Na wykresie rysunku 2 przedstawiono zmiany gęstości energii w porze dziennej dla $\Theta = 40^\circ$. Krzywą górną wyznaczono dla bezchmurnego dnia letniego charakteryzującego się mało zmiennymi warunkami pogodowymi.

mi. Wartość pola pod krzywą określa średni dzienny wydatek energii słońca na metr kwadratowy powierzchni poziomej. Krzywa środkowa odpowiada warunkom zimowego dnia również bezchmurnego. Różnice energetyczne są spowodowane oczywiście zmianą kąta deklinacji Ziemi. Zależności analityczne między gęstością powierzchniową energii a zmianami położenia osi Ziemi względem Słońca są bardziej złożone. Można zatem odnotować tylko fakt, iż taki związek ilościowy istnieje — efekt pokazano na rysunku. Krzywa dolna obrazuje zjawisko dość częste. Dzień pochmurny, wietrzny, warunki nasłonecznienia nie tylko nienajlepsze, lecz także bardzo zmienne. Wynikiem jest „postrzępiony przebieg” w ciągu dnia powierzchniowej gęstości energii.

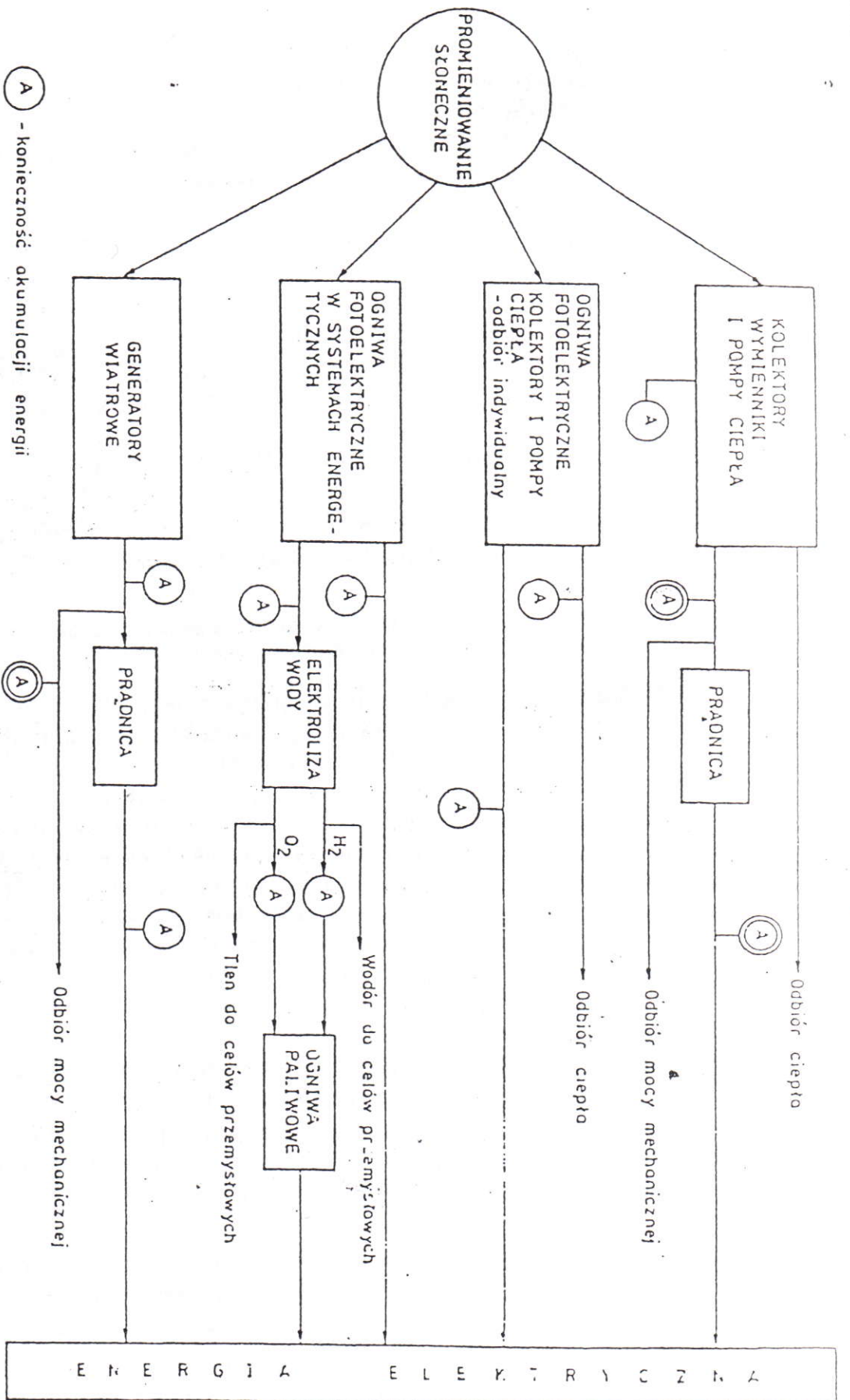


Rys. 2.

Krzywa zmian gęstości energii (Intensywności nasłonecznienia) w czasie dla szerokości geograficznej 40°

.../Energję słoneczną należy akumulować. Bez jej akumulacji technika i technologia wykorzystania promieni Słońca po prostu nie mają sensu. Dotyczy to dwojakiej postaci energii naturalnej: bezpośrednio słonecznej oraz związanej z nią wiatrowej.

Spośród wszystkich możliwych przemian, zamiana energii promieniowania słonecznego na prąd elektryczny jest uznawana przez fachowców za najistotniejszą. Wymaga ona skomplikowanych urządzeń technicznych oraz wyboru metody przetwarzania energii. Kryteriami są tu współczynniki sprawności przetworników, system magazynowania energii oraz pośredni sposób jej wykorzystania. Najłatwiej wyjaśnić tę myśl posługując się rysunkiem 3, na którym widać, że możliwości jest kilka. Pierwsza możliwość jest dość tradycyjna. Energia promieniowania Słońca jest zbierana za pomocą kolektorów pochłaniających ciepło. Następnie ciepło to akumulowane i przetwarzane w systemie odpowiednich wymienników i pomp ciepła zasila turbinę napędzającą prądnicę prądu przemiennego. Użyłem na wstępie słowa „dość”, gdyż ta metoda otrzymywania energii elektrycznej w rzeczywistości różni się od metod stosowanych w klasycznych ciepłych elektrowniach tylko sposobem wytwarzania ciepła. Jest jeszcze jedna wyróżniająca cecha: w omawianym przypadku konieczna jest akumulacja energii. Przede wszystkim magazynowanie energii cieplnej, aby zapewnić jej dostawę równomiernie w czasie doby. Chwilowe nadwyżki energii cieplnej mogą być również akumulowane zarówno w postaci energii mechanicznej, jak też elektrycznej. Kolejne sposoby wykorzystania energii Słońca nie noszą z pewnością cech konwencjonalności.



Rys. 3.

Sposoby zamiany energii słonecznej na energię elektryczną z uwzględnieniem możliwości akumulacji energii

Z rysunku 3 wynika, że do przetwarzania energii Słońca są przeważnie wykorzystywane ogniwa fotoelektryczne. Ich współczesne zastosowanie

ograniczają nadmierne koszty. Ile węc kosztuje fotoelektryczne ogniwo? Odpowiedź na to pytanie z pewnością wyjaśni, czy i kiedy zapewnią one sobie opłacalną techniczną egzystencję.

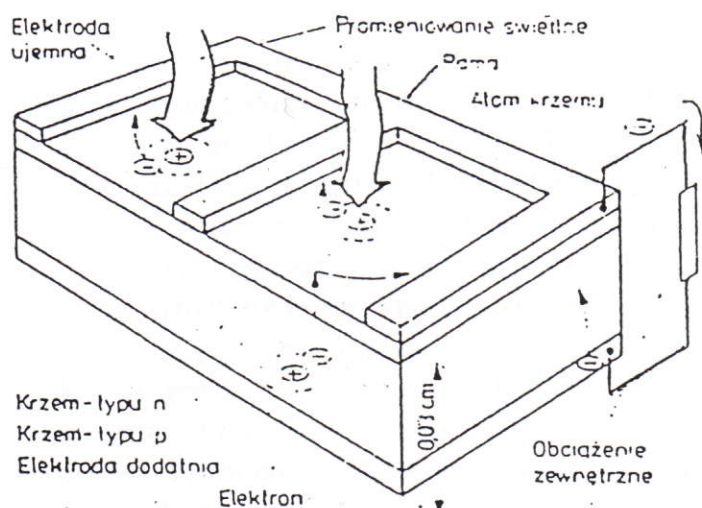
Ogniwa fotoelektryczne użyto po raz pierwszy w roku 1958 na satelicie Vanguard. Wcześniej, bo w roku 1954, gdy naukowcy z Bell Laboratories odkryli, że pojedyncze kryształy krzemu przetwarzają energię promieni słonecznych na elektryczność, stosowanie fotoogniw zbudowanych z pojedynczych kryształów krzemu (mimo iż światło słoneczne nic nie kosztuje) w porównaniu z innymi metodami otrzymywania prądu elektrycznego nie opłacało się. Cena baterii, która w południe słonecznego dnia pracowała z mocą 1 wata, wynosiła 600 dolarów. Ogniwo zbudowane z pojedynczych kryształów krzemu osiąga największą efektywność od 14 do 17 procent (tyle energii słonecznej przetwarza na prąd elektryczny) i do dziś jest najdroższe. Bardziej ekonomiczną metodą uzyskiwania fotoogniw posługuje się firma Mobil Solar Energy Corporation. Stopiony krzem jest rozciągany na wąskie paski, a potem cięty za pomocą lasera na ogniwa, które mają sprawność 11...12 procent. Firma Solarex Corporation w stanie Maryland wytwarza baterie poprzez oziębianie roztopionego krzemu we wlewkach o kształcie cegiełek i cięcie go na prostokątne płytki. Wszystkie te multikrystaliczne ogniwa są mniej wydajne (12%) od ogniw z pojedynczych kryształów krzemu, ale ze względu na ich prostokątny kształt można więcej ich umieścić w układzie, przez co wzrasta jego ogólna efektywność.

Ostatnio są opracowywane ogniwa nowego rodzaju i w związku z tym oczekuje się, że około roku 1990 koszt energii elektrycznej (wg Mobil Solar) zmniejszy się do kilkunastu centów za kilowatogodzinę. Pod tym względem „energetyka słoneczna” stałaby się już konkurencyjna być może nawet dla energetyki jądrowej. Oczywiście chodzi o koszt jednostki mocy.

Obecnie, mimo że prąd otrzymywany w taki sposób jest jeszcze dość drogi, ogniwa fotoelektryczne w przodujących krajach rozpowszechniają się coraz bardziej. Siłownie słoneczne zasilają w energię nawet domostwa położone w odległych miejscowościach. W roku 1983 sprzedano fotoogniwa o łącznej mocy 18 megawatów. Jest to moc czterokrotnie większa od zainstalowanej w roku 1981 i tysiąckrotnie większa od mocy wszystkich urządzeń energetyki słonecznej, jakie działały w roku 1973.

Fizyka fotoogniw

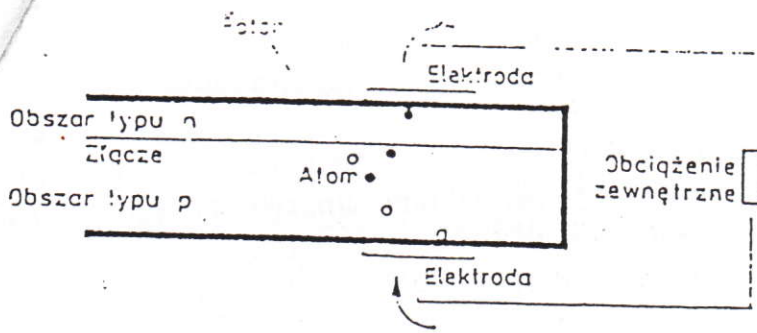
Typowe fotoogniwo ma kształt prostokątny o wymiarach kilka na kilka centymetrów. Taki właśnie kształt pozwala na maksymalne wykorzystanie powierzchni skierowanej ku słońcu i zabudowanej elektrycznymi przetwornikami jego energii. Pojedyncze fotoogniwa nie mogą mieć dużych rozmiarów, bowiem krzem jest kruchy, łatwo pęka. Naprężenia wewnętrzne uniemożliwiają produkcję jednego ogniwa potrzebnego do wytwarzania prądu o odpowiednim napięciu. Tworzy się więc baterię fotoogniw, każde o małych wymiarach, łączonych równolegle i szeregowo, aby uzyskać wymagane parametry napięciowo-prądowe.



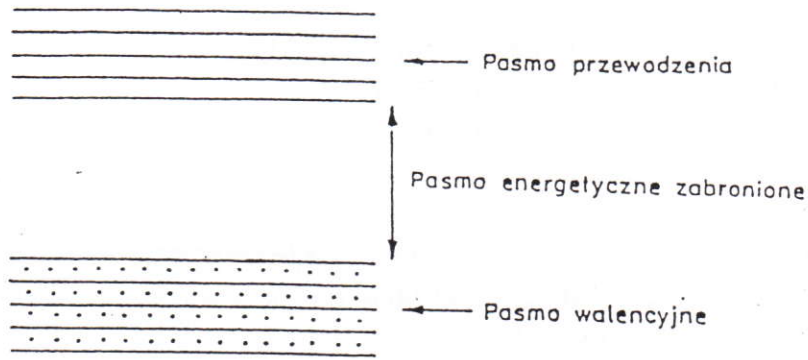
Rys. 4.
Zasada budowy fotoogniwa

Grubość fotoogniwa jest znikoma w porównaniu z jego długością i szerokością. Ogniwo pokazane na rysunku 4 ma grubość zaledwie 0,03 centymetra. Proces wytwarzania prądu elektrycznego zależy przede wszystkim od powierzchni fotoogniwa, stąd im jest ono cieńsze, tym mniej kosztuje. Oczywiście, jak we wszystkim na tym świecie, kompromis techniczno-technologiczny określa za każdym razem możliwość wykonania minimalnie cienkiego ogniwa.

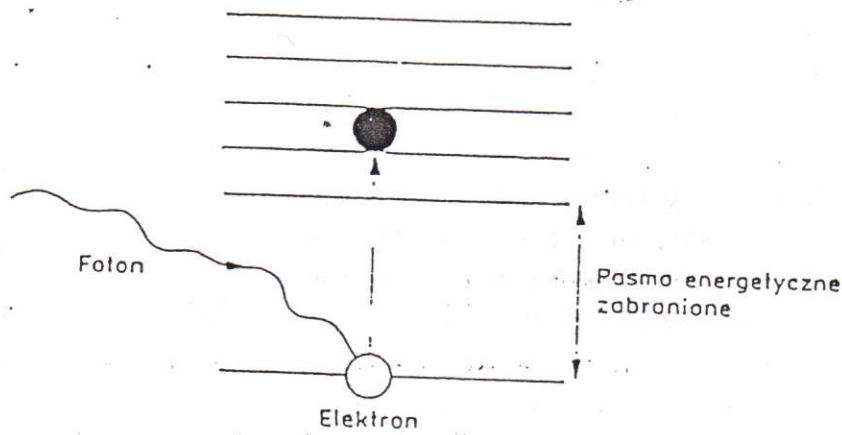
Fotoogniwo składa się z cienkiej powierzchni krzemu typu n, to znaczy takiego półprzewodnika, którego podstawowymi nośnikami energii są elektrony. Powierzchnia typu n ma zaledwie kilka mikrometrów grubości. Grubsza jest powierzchnia krzemu typu p o ładunkach dodatnich i dziurach jako podstawowych nośnikach. Górna część fotoogniwa jest oprawiona w metalową ramkę, tworzącą styk elektryczny (ujemny), umożliwiającą przepływ prądu. Wymagania stawiane tej ujemnej elektrodzie dotyczą przede wszystkim minimalizacji jej powierzchni, aby nie przesłaniała zbyt wiele promieniowania świetlnego. Dolna część fotoogniwa jest pokryta dobrze dopasowanym metalowym stykiem prądowym stanowiącym dodatnią elektrodę. Górna powierzchnia fotoogniwa musi mieć ukie-



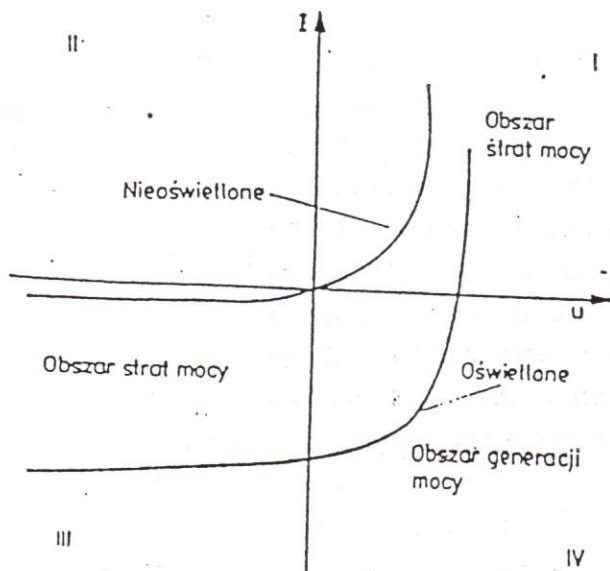
Rys. 5.
Zasada działania
fotoogniwa



Rys. 6.
Schemat poziomów
energii dla
półprzewodnika



Rys. 7.
Kolizja fotonu
z elektronem
W wyniku kolizji
elektron uzyskuje
aktywność
umożliwiającą mu
przejście przez pasmo
energetyczne
zabronione (zjawisko
pary dziura — elektron
jest możliwe jeżeli
energia fotonu jest
większa od energii
potrzebnej do
pokonania pasma
energetycznego
zabronionego)



Rys. 8.
Efekt oświetlenia
złącza p-n
fotoogniwa
I — prąd, u — napięcie

runkowaną jednorodną strukturę, a więc powinna być chemicznie wytrawiona, bez mikroskopijnych nierówności powodujących niepotrzebne kierunkowe odbicie światła, czyli zmniejszenie efektywności ogniwa.

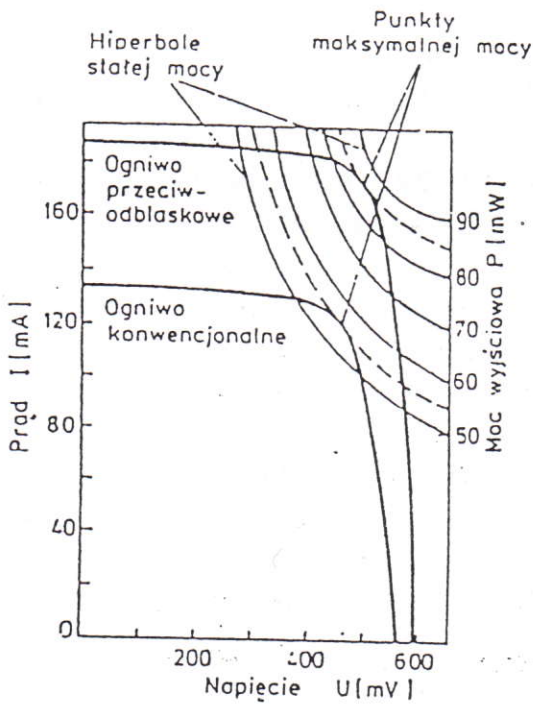
Półprzewodnik typu n nie może być narażony na korozyjne działanie atmosfery ziemskiej. Przykrywa się go specjalnym szkłem lub tworzywem sztucznym. Osłona chroni też fotoogniwo przed mechanicznym uszkodzeniem. Obecność osłony pogarsza oczywiście sprawność ogniwa, lecz jest konieczna. Stąd wynika wymaganie, aby osłona pochłaniała jak najmniejszą ilość promieniowania.

Promieniowanie w przedziale widzialnym i podczerwieni (por. rys. 1) wywołuje powstanie w fotoogniwie efektu strumienia elektronów. Energia tego promieniowania dochodzi do złącza i dolnej części ogniwa przez cienką warstwę górną. Fotony usuwają elektrony z jej sieci krystalicznej i powodują powstanie ekwiwalentnego ładunku dodatniego, czyli dziur. Zachodzi wówczas zjawisko (spowodowane przez promieniowanie energetyczne w zakresie większych długości fali) polegające na przesunięciu elektronu z pasma walencyjnego, przeskoczenia przez niego pasma energetycznego zabronionego i pojawienie się go w pasmie przewodzenia. Działa więc mechanizm wytwarzania ładunku dodatniego oraz ujemnego zwanego parą dziura — elektron, pojawiającego się w obszarze złącza. W rezultacie powstaje wewnętrzne lokalne pole elektryczne, spolaryzowane w taki sposób, że następuje przesunięcie ruchomych elektronów do struktury typu n oraz wyżej do elektrody ujemnej, a także dziur — do struktury typu p. Oczywiście całe opisane tu zjawisko może zajść wówczas, gdy energia fotonu jest większa od energii niezbędnej na pokonanie pasma energetycznego zabronionego. Ilustrują to rysunki 5, 6 i 7.

W procesie zamiany przez fotoogniwo energii promieniowania świetlnego na energię elektryczną ogniwo nagrzewa się i w efekcie następuje osłabianie wytwarzania ładunków elektrycznych. Nie pozostaje to bez wpływu na sprawność fotoogniwa.

Wyjaśnienia wymagają podstawowe charakterystyki fotoogniw, stanowiące o ich energetycznej przydatności. Każde ogniwo zawiera relatywnie rozległe złącze p-n. Ta cecha fizyczna umożliwia porównanie go do diody półprzewodnikowej. Charakterystyka napięciowo-prądowa ogniwa nieoświetlonego jest odpowiednikiem klasycznej charakterystyki diody krzemowej (rys. 8), łącznie z niewielkim prądem w kierunku zaporowym. Oczywiście przebiegi w pierwszej ćwiartce układu współrzędnych odpowiadają stratom mocy, czyli jej poborem przez ogniwo. Charakterystyka napięciowa fotoogniwa oświetlonego ma kształt pokazany w dolnej części wykresu na rysunku 8. Przebieg w czwartej ćwiartce układu odpowiada zakresowi pracy fotoogniwa, w którym oświetlenie generuje moc elektryczną. Ze względów praktycznych ten obszar pracy fotoogniwa ma rzecz jasna podstawowe znaczenie.

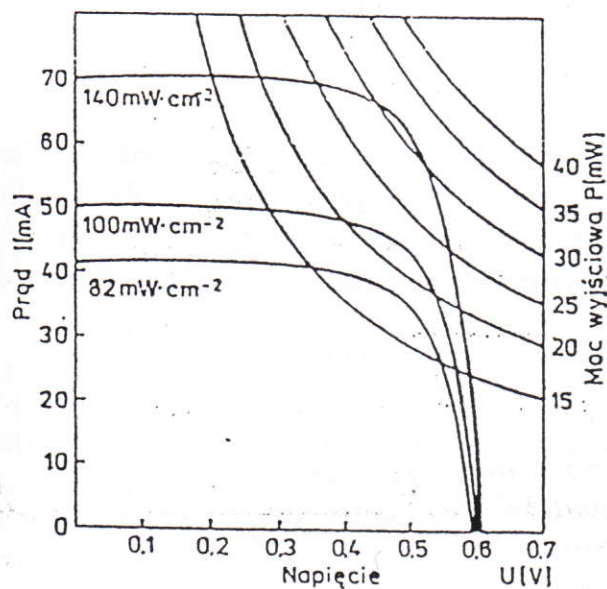
Wszystkie charakterystyki fotoogniw są odniesione do tej właśnie części jego charakterystyki napięciowo-prądowej. Taką charakterystykę ogniwa o powierzchni ograniczonej wymiarami 2×2 centymetry przedstawiono na rysunku 9. Siła elektromotoryczna tego ogniwa wynosi 0,6 wolta. Na rysunku 9 pokazano charakterystyki napięciowo-prądowe dla dwóch rodzajów ogniw: fotoogniwa normalnego o wytrawianej jednorodnej geometrycznie powierzchni oraz fotoogniwa o powierzchni przeciwodblaskowej. Ta powierzchnia jest utworzona z małych piramid krzemu o wysokości od 2 do 4 mikrometrów uzyskanych za pomocą rytowania. Jest nierówna i niewygladzona.



Rys. 9.
Charakterystyki napięciowo-prądowe
fotoogniw: przeciwodblaskowego
i konwencjonalnego w temperaturze
25°C w warunkach próżni

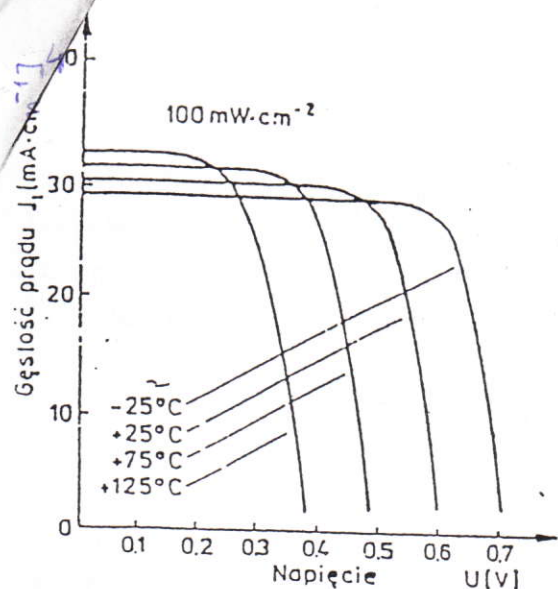
Technologia wykonania ogniwa przeciwodblaskowego polega na wytworzeniu dużej powierzchni właściwej absorbującej światło. Otóż absorbującej, a nie odbijającej. Ogniwo konwencjonalne o znacznej gładkości powierzchni wykazuje, w porównaniu z fotoogniwem przeciwodblaskowym, mniejszy stopień absorpcji promieniowania, wynikającej z takiej a nie innej, notabene znacznie łatwiejszej i tańszej do wykonania, geometrii powierzchni. Gdyby powierzchnia nierówna była wypolerowana, to współczynnik odbicia światła zwiększyłby się. W ogniwach przeciwodblaskowych te mikroskopijne nierówności, uzyskane przez specjalne nacina- nie, są w pewnym sensie chropowate. Z tego właśnie względu maksymalna moc fotoogniwa przeciwodblaskowego wynosi 85 miliwatów przy jego maksymalnej sprawności 15,6 procenta (patrz rys. 9). Odpowiednie wartości mocy i sprawności ogniwa konwencjonalnego są mniejsze i wynoszą 56 miliwatów oraz 10,3 procenta.

Należy ponadto zaznaczyć, że omawiany wykres uzyskano dla warunków próżniowych, gdy światło słoneczne nie rozpraszane przez atmosferę pada bezpośrednio na fotoogniwo. Istnieje jeszcze jedno kryterium porównawcze odniesione do warunków atmosferycznych na powierzchni Ziemi, gdy światło słoneczne rozpraszane przez atmosferę, przy określonym zachmurzeniu lub jego braku, pada na fotoogniwo. Zazwyczaj, jak wskazują badania, w tym drugim przypadku sprawność fotoogniwa jest nieco większa, niż wykazana przy pomiarze w warunkach próżniowych. Promieniowanie słoneczne jest zmienne w czasie. Jego intensywność najłatwiej określić poprzez liczbę watów na metr kwadratowy (por. rys. 1) lub w jednostkach pochodnych. Efekt zmiany nasłonecznienia fotoogniwa o powierzchni 1×2 centymetry w warunkach stałej temperatury i niezmiennego widma promieniowania pokazano na rysunku 10. Te charakterystyki wyznaczono w warunkach atmosferycznych, stąd mniejsze moce wyjściowe. Nasłonecznienie 100 miliwatów na centymetr kwadratowy odpowiada, o czym już wspomniano, średnim warunkom docierania na powierzchnię Ziemi promieniowania świetlnego o intensywności 1 kilowata na metr kwadratowy.



Rys. 10.
Typowe charakterystyki fotoogniwa o wymiarach 1×2 cm dla trzech różnych intensywności naświetlania przy stałej temperaturze ogniwa

Wspominano uprzednio o zmianie temperatury fotoogniwa w trakcie jego pracy. Oczywiście zmiana ta pozostaje w ścisłym związku z temperaturą zewnętrzną. Wpływ temperatury ogniwa na jego charakterystykę napięciowo-prądową ilustruje rysunek 11. Łatwo zauważyć, że wzrost temperatury ogniwa łączy się ze zmniejszeniem mocy wyjściowej. Omówione charakterystyki wyznaczono w różnych temperaturach dla ogniwa krzemowego n-p z rozproszonym fosforem i domieszką boru, o głębokości złącza 0,2 mikrometra, o powierzchni przeciwodblaskowej pokrytej tlenkiem tantalu oraz o srebrnych elektrodach.



Rys. 11.

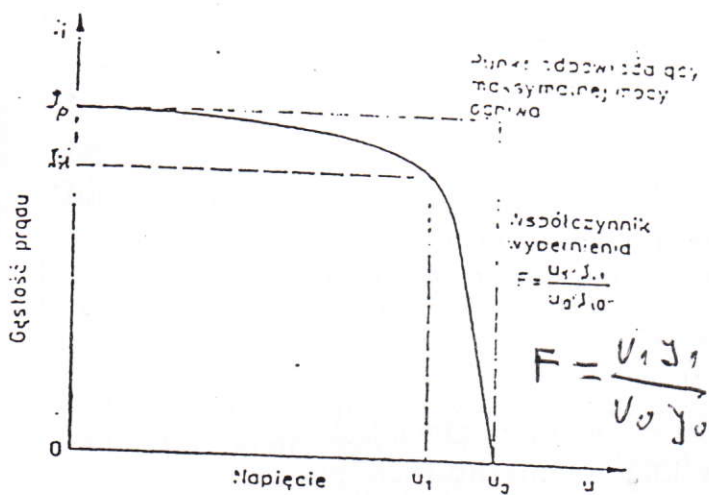
Wpływ temperatury ogniwa na zmiany napięcia i prądu przy intensywności naświetlenia 100 mW/cm^2 w warunkach atmosferycznych

Analiza zależności mocy wyjściowej od temperatury fotoogniwa jest niezbędna ze względów praktycznych. W wysokich temperaturach pracy, aby utrzymać minimalną zadaną a priori moc wyjściową, może zaistnieć konieczność zwiększenia liczby ogniw i ich łączenia w układy szeregowo-równoległe. Ponadto instalację fotoelektryczną należy projektować w sposób zróżnicowany dla obszarów Ziemi o niskich i wysokich średnich temperaturach rocznych.

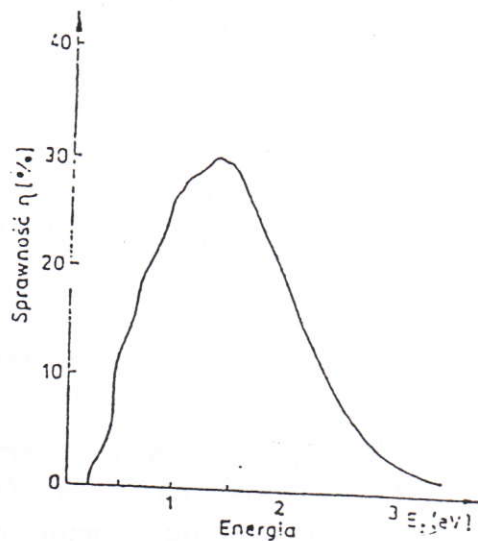
Dla porównania właściwości różnych konstrukcji fotoogniw wprowadzono pojęcie współczynnika wypełnienia. Współczynnik wypełnienia wyznacza się za pomocą krzywej zależności gęstości powierzchniowej prądu fotoogniwa od napięcia między jego elektrodami. Punktami charakterystycznymi są tu: siła elektromotoryczna, maksymalna gęstość prądu oraz maksymalna moc. Współczynnik wypełnienia w sposób prosty określa konstrukcję, technologię i wykonanie fotoogniwa. Dla dobrych fotoogniw współczynnik wypełnienia wynosi minimum 0,8. Bardzo dobre ogniwa charakteryzują współczynniki o większej wartości. Spłaszczenie krzywych poniżej i powyżej punktu maksymalnej mocy jest celem, do którego dąży się w procesie konstruowania fotoogniwa.

Sposób wyznaczania współczynnika wypełnienia pokazano na rysunku 12. Gęstość prądu podaje się zazwyczaj w miliamperach na centymetr kwadratowy. Mówiąc najprościej, współczynnik wypełnienia jest stosunkiem pól dwóch powierzchni określonych na charakterystyce prądowo-napięciowej $J_1(U)$.

Na zakończenie omówienia fizyki fotoogniwa warto poruszyć zagadnienie sprawności przetwarzania energii. Rozważając straty powstałe podczas wytwarzania prądu można określić optymalną wartość energii potrzebnej do pokonania przez elektron pasma energetycznego zabronionego. S. A. Ahmed z City College of New York określa wartość tej energii



Rys. 12.
Zasada wyznaczania współczynnika wypełnienia dla fotoogniwa



Rys. 13.
Teoretyczna idealna sprawność fotoogniwa η jako funkcja E_g energii pasma energetycznego zabronionego wyznaczona dla temperatury 300 K

na 1,5 elektronowolta. Wytworzenie takiej lub większej energii przez foton lub inaczej — nietracenie przez niego zbyt dużej energii w górnej części ogniwa decyduje o sprawności przemiany energii. Dla przykładu ogniwo arsenowo-gallowe o wartości energii pasma zabronionego 1,4 elektronowolta osiąga maksymalną sprawność teoretyczną 96 procent. Ogniwo krzemowe o mniejszej energii przejścia wynoszącej 1,1 elektronowolta ma mniejszą sprawność teoretyczną — 29 procent. Zależność między omawianymi wielkościami pokazano na rysunku 13.

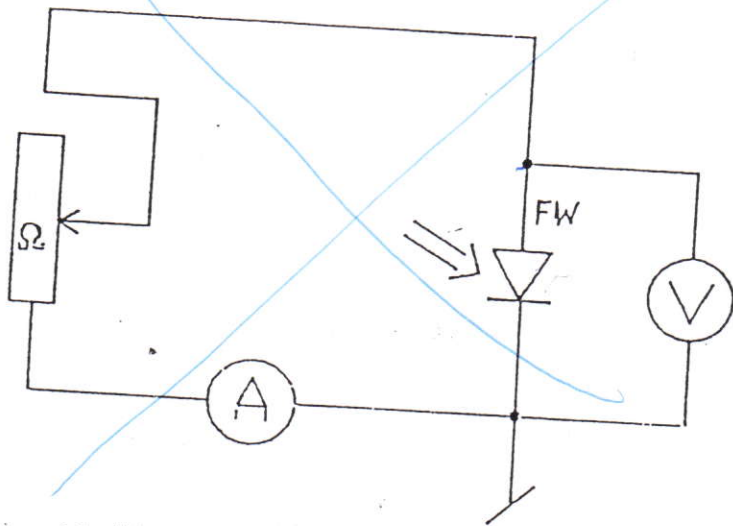
Sprawdając definicję sprawności fotoogniwa do warunków praktycznych należy uzależnić ją od intensywności nasłonecznienia (mierzonej w watach na metr kwadratowy) powierzchni absorbującej promieniowanie świetlne oraz od konstrukcji fotoogniwa. Współczynnik sprawności lub efektywności przemian energetycznych ogniwa η jest ilorazem iloczynu siły elektromotorycznej U_0 (napięcia ogniwa przy prądzie obciążenia równym zero), prądu maksymalnego I_m (dla napięcia równego zero) i współczynnika wypełnienia F przez iloczyn intensywności nasłonecznienia (gęstości promieniowania) J_e i powierzchni absorbującej A . Zależności te można przedstawić za pomocą wzoru

$$\eta = \frac{U_0 I_m F}{J_e A} \left[\frac{W}{W} \right]$$

Na rysunku 14 pokazano schemat stanowiska pomiarowego, z ogniwem fotowoltaicznym. Układ ten pozwala określić charakterystyki napięciowo-prądowe ogniwa przy zmiennej wysokości źródła promieniowania względem ogniwa. Przykładowa charakterystyka tego ogniwa pokazana jest na kolejnym rysunku (rys. 15).

Program badań:

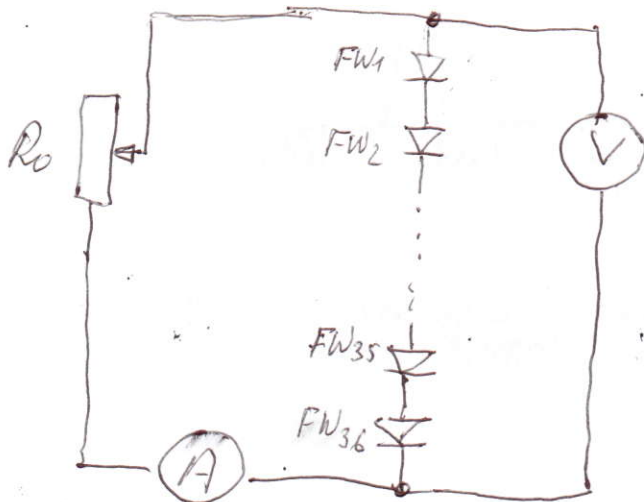
1. Określenie charakterystyk napięciowo-prądowych fotoogniwa przy różnych wysokościach źródła promieniowania.
2. Określenie maksymalnej mocy ogniwa.
3. Określenie współczynnika wypełnienia.



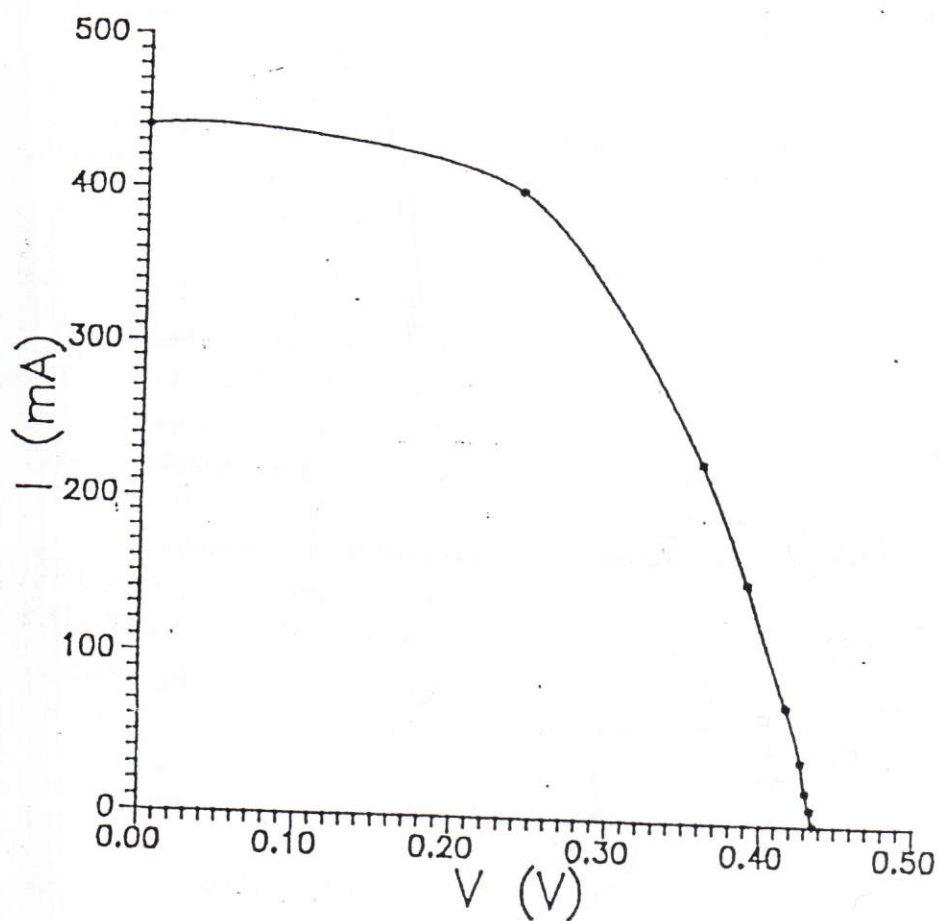
Rys. 14.

INTENSYWNOSĆ PROMIENIOWANIA $2 \text{ kW/m}^2 \approx 50 \text{ cm}$

POWIERZCHNIA OGNIWA $0,18 \text{ m}^2$



36 ogniw
powierzchnia
łącznie wszystkich ogniw
 $S = 0,36 \text{ m}^2$



Rys. 15. Charakterystyka prądowo-napięciowa krzemowego ogniwa fotowoltaicznego przy $h=15\text{cm}$.