

CZU: 621.383: 535.215.4-15

CELULE FOTOVOLTAICE CU HOMOJONCTIUNE DIN InP: REZULTATE ȘI COMPARĂRI

*Vasile BOTNARIUC, Petru GAȘIN, Leonid GORCEAC,
Boris CINIC, Andrei COVAL, Simion RAEVSCHI*

Universitatea de Stat din Moldova

Au fost obținute homojoncțiuni n-pInP cu strat intermediar p⁻InP crescut repetat prin metoda HVPE cu sau fără strat frontal nCdS și au fost cercetate proprietățile electrice și fotoelectrice ale acestora. S-a constatat că depunerea stratului intermediar mărește fotosensibilitatea homostructurilor cu 15...20%. Eficiența energetică a CF cu structura n⁺CdS-n⁺InP-p⁻InP-p⁺InP constituie 13,5% pentru fluxul luminos incident de 100 mW·cm⁻². Eficiența CF cu heterostructura nCdS-pInP și cu strat intermediar similar crește cu 27%, în comparație cu CF cu homostructura n-p⁻pInP și cu strat frontal nCdS, având valoarea de 17,3%. Se conturează posibilitatea reală de mărire a eficienței CF de acest tip.

Cuvinte-cheie: homojoncțiune, heterojoncțiune, celulă fotovoltaică, eficiență, fotosensibilitate, fosfură de indiu, sulfură de cadmiu.

FOTOVOLTAIC CELLS WITH HOMOJUNCTIONS IN InP: RESULTS AND COMPARISONS

Electrical and photoelectrical properties of InP p-n homojunctions with an intermediate p-InP layer repeatedly grown by HVPE method, with and without frontal nCdS layer were produced and studied. It was found that the deposition of this intermediate p⁻InP layer increases the cells photosensitivity by 15 ... 20%. The solar energy conversion efficiency of photovoltaic cell (PC) with n⁺CdS-n⁺InP-p⁻InP-p⁺InP structure is 13.5% at the illumination of 100 mW·cm⁻². The efficiency of the PC based on nCdS-pInP heterostructure and an analogic intermediate layer increases to 27% compared with the PC based on n-p⁻pInP homostructure having a frontal nCdS layer has an efficiency of 17.3%. The possibility of increasing of the efficiency of this PC type is formulated.

Keywords: homojunction, heterojunction, photovoltaic cell, efficiency, photosensitivity, indium phosphide, cadmium sulfide.

Introducere

Celule fotovoltaice (CF) din InP, cu avantaje evidente, se realizează pe bază de homojoncțiuni sau heterojoncțiuni obținute prin difuzie, implantare cu ioni, tehnologii epitaxiale din faza lichidă sau gazoasă ori prin diferite combinații ale acestora [1].

În cazul CF cu homojoncțiunea n-pInP se aplică difuzia S sau Se în substraturi din pInP în sistem închis [2] sau deschis [3]. Autorii [3] au obținut joncțiuni n-p calitative ($n \sim 1$, $I_0 \sim 9,6 \cdot 10^{-16}$ A·cm⁻²), asigurând astfel eficiența în condițiile AM1 de 16,3% pentru CF cu aria fotoactivă de 0,265 cm².

Autorii [4] au trecut de la homostructura n-pInP la cea de tip n⁺-p⁻-p⁺InP, utilizând pentru obținerea ei metoda de depunere chimică din vaporii compușilor metaloorganici. Eficiența CF pe baza acestor structuri constituie 19,7%, condițiile AM1,5 cu parametrii $U_{cd}=0,827$ V, $j_{sc}=30$ mA·cm⁻², $FF=0,79$, $R_s=0,5$ Ω·cm². Concretizăm că pentru CF cu structura n-pInP $R_s=1,5$ Ω·cm².

În această lucrare sunt prezentate rezultatele cercetării proprietăților electrice și fotoelectrice ale celulelor fotovoltaice realizate pe bază de homojoncțiune n-pInP cu strat epitaxial intermediar p⁻InP depus repetat utilizând tehnologia de epitaxie din faza gazoasă în sistemul In-PCl₃-H₂ (metoda HVPE) cu sau fără strat frontal n⁺CdS.

Tehnologia de obținere și metode de cercetare

În calitate de substrat au fost utilizate plachete din pInP dopate cu Zn la nivelul concentrației purtătorilor de sarcină de $(1...3) \cdot 10^{18}$ cm⁻³, orientarea cristalografică (100) și dezorientarea de 3...5° spre planul (110), tăiate din lingouri crescute prin metoda Czochralski.

Procedeu tehnologic de depunere a stratului epitaxial intermediar p⁻InP pe substratul p⁺InP cuprinde: purificarea sursei de In într-un flux de hidrogen purificat prin tratare termică; saturarea sursei în vapori de fosfor (750°C); depunerea unui strat epitaxial p⁻InP dopat cu Zn (650°C) prin metoda HVPE; decaparea

integrală a acestui strat în HCl-gaz; creșterea repetată a stratului până la grosimea 3...4 μm și a parametrilor electrici – $\rho \leq 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\mu > 100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Creșterea stratului epitaxial nInP dopat cu Te pe stratul intermediar pInP se efectuează în același procedeu tehnologic aplicând aceeași metodă HVPE. Astfel, au fost preparate homostructuri de tip nInP-pInP-pInP pentru realizarea CF.

Au fost preparate și structuri de tip nCdS-nInP-pInP-pInP, care permit realizarea CF cu strat fereastră nCdS pentru extinderea gradului de utilizare a spectrului luminii incidente pe suprafața structurii și optimizarea rezistenței în serie.

Stratul fereastră nCdS, cu grosimea de 5...6 μm , a fost depus la temperatura de 710°C prin metoda volumului cvasiînchis în flux de H₂ (debitul 500 cm³/min) cu parametrii: $\rho = 10^{-2} \dots 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, $\mu = (150 \dots 200) \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $n = (5 \dots 10) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Contactul ohmic recto pentru stratul frontal nInP sau nCdS al structurii fotovoltaice a fost depus sub formă de grilă, prin evaporarea termică în vid a In, iar în calitate de contact ohmic verso pentru substratul pInP a fost depus aliajul Ag+5%Zn. Depunerea contactelor a fost urmată de tratarea termică în H₂ la 200 și, respectiv, 400°C.

Fotosensibilitatea homostructurilor obținute au fost cercetate la 300 K cu ajutorul monocromatorului MDP-23 cu rezoluția 2,6 nm/mm. Caracteristicile curent-tensiune la întuneric și la iluminare au fost cercetate utilizând complexul computerizat KEITHLEY 4200-SCS.

Rezultate și interpretări

Cercetarea caracteristicilor $I=f(U)$ ale homostructurilor nInP-pInP-pInP cu sau fără strat frontal nCdS la întuneric și iluminare cu fluxul luminos cu puterea 100 mW·cm⁻² (Fig.1) demonstrează următoarele:

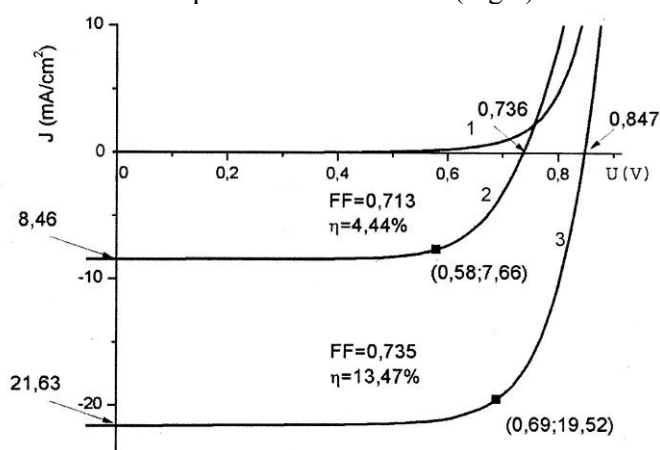


Fig.1. Caracteristicile I – U ale homostructurii nInP-pInP-pInP (p⁻ crescut repetat):

- 1 – la întuneric, cu strat frontal nCdS;
- 2 – la iluminare (E=100 mW·cm⁻²) fără (2) și cu strat frontal nCdS (3).

- potențialul barierei energetice la 300 K, determinat din caracteristica I – U, constituie 0,74...0,76 V, ceea ce este în concordanță cu valorile acestuia determinate din caracteristica C – U;

- dependența $I=f(U)$ la întuneric și polarizarea directă corespunde relației $I=I_s \exp(\frac{eU}{AkT} - 1)$. Coeficientul

de idealitate A constituie 2...2,4, caracteristic pentru mecanismul de transport al purtătorilor de sarcină, determinat de procesul generare-recombinare în zona de sarcină spațială a homojoncțiunii;

- densitatea curentului de saturație I_s constituie $(1 \dots 4) \cdot 10^{-8} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$;

- la iluminarea cu fluxul luminos $E=100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ $I_{sc}=8,5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, $U_{cd}=0,740 \text{ V}$ pentru homostructura nInP-pInP-pInP fără strat frontal nCdS și 21,6 mA·cm⁻² și 0,85 V – homostructura cu strat frontal nCdS;

- valoarea coeficientului de umplere FF de 0,71 și 0,74 asigură eficiența conversiei energiei solare în cea electrică de 4,4% pentru homostructura nInP-pInP-pInP fără stratul frontal nCdS și 13,5% – pentru homostructura cu acest strat. Creșterea eficienței în cazul homostructurii cu strat fereastră nCdS se datorează faptului că acest strat reduce viteza de recombinare la suprafața structurii ($E_{gCdS}=2,42 \text{ eV}$, $E_{gInP}=1,34 \text{ eV}$), micșorează rezistența în serie a CF și coeficientul de reflecție.

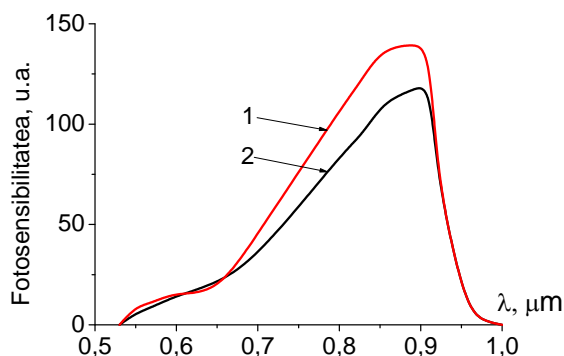


Fig.2. Fotosensibilitatea CF cu homostructura $n^+InP-p-InP-p^+InP$ ($p-InP$ crescut repetat) cu (1) sau fără (2) strat frontal n^+CdS .

Fotosensibilitatea structurii $n^+InP-p-InP-p^+InP$, cu strat fereastră $nCdS$ (Fig.2), la valoarea maximă este cu 15...20% mai pronunțată decât cea a structurii fără acest strat, ambele corespund, după formă, curbei caracteristice pentru homojuncțiune și cuprind intervalul lungimilor de undă 500...950 nm.

Comparări

În Figura 3 sunt prezentate caracteristicile de sarcină pentru homojuncțiunea $n^+CdS-n^+InP-p-InP-p^+InP$ (1) și heterojuncțiunea $n^+CdS-p-InP-p^+InP$ (2) la iluminarea cu fluxul $100 mW \cdot cm^{-2}$.

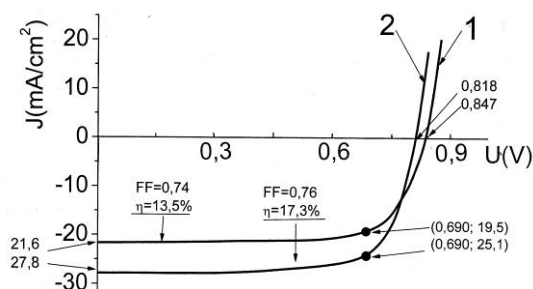


Fig.3. Caracteristicile de sarcină ($E=100 mW \cdot cm^{-2}$):
1 – homojuncțiunea $n^+CdS-n^+InP-p-InP-p^+InP$;
2 – heterojuncțiunea $n^+CdS-p-InP-p^+InP$.

Se observă că utilizarea tehnologiei modificate de obținere a stratului intermediar $p-InP$ permite atingerea eficienței de 17,3% a CF cu heterojuncțiune, adică o eficiență cu 3,8% mai mare decât cea de 13,5% a CF cu homojuncțiune. În cazul CF cu heterojuncțiune acest fapt se datorează, în primul rând, utilizării mai eficiente a spectrului vizibil, ceea ce se demonstrează prin compararea fotosensibilității acestor două structuri (Fig.4).

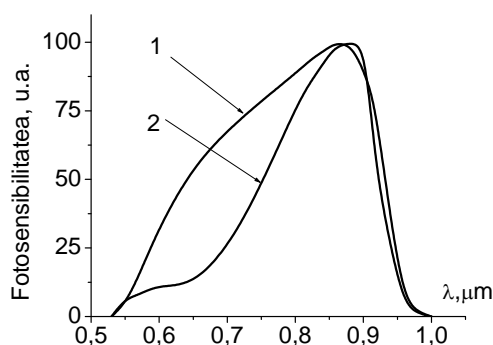


Fig.4. Fotosensibilitatea CF:
1 – HJ $n^+CdS-p-InP-p^+InP$ ($p-InP$ crescut repetat);
2 – homostructura $n^+CdS-n^+InP-p-InP-p^+InP$ ($p-InP$ crescut repetat) cu strat frontal n^+CdS .

Căile reale de majorare a randamentului CF cu homo- și heterojoncțiune din InP pot fi formulate după cum urmează:

- majorarea suprafeței active a CF până la 95...97% prin optimizarea geometriei contactului frontal;
- utilizarea stratului frontal antireflectant ce va micșora până la 2% pierderile prin reflecția luminii incidente;
- utilizarea ferestrei optice dintr-un material semiconductor cu ΔE_g mare;
- micșorarea pierderilor legate de rezistența în serie (R_s) și rezistența șunt (R_{sh}) ale CF;
- majorarea lungimii de difuziune a purtătorilor de sarcină minoritari, ceea ce va provoca creșterea coeficientului de colectare a acestora.

Concluzii

Au fost cercetate proprietățile electrice și fotoelectrice ale homojoncțiunilor n^+p^+InP cu strat epitaxial intermediar p^-InP depus repetat cu sau fără strat fereastră n^+CdS . S-a constatat că homostructura $n^+CdS-p^+InP-p^-InP-p^+InP$ are fotosensibilitatea mai pronunțată cu 15...20%, iar eficiența CF pe baza lor constituie 13,5%, spre deosebire de 4,4% pentru CF obținute pe baza structurii fără strat frontal n^+CdS . CF pe baza heterojoncțiunii $nCdS-pInP$ cu strat intermediar p^-InP crescut repetat depășește cu 27% eficiența CF cu homojoncțiunea $n^+InP-p^-InP-p^+InP$ cu strat frontal $nCdS$, fapt datorat utilizării mai eficiente a spectrului fluxului luminos incident.

Referințe:

1. BOTNARIUC, V., GAȘIN, P., GORCEAC, L., INCULEȚ, I., CINIC, B., COVAL, A., RAEVSCHI, S. Celule fotovoltaice cu heterojoncțiunea $nCdS-pInP$. În: *Studia Universitatis Moldaviae. Seria „Științe exacte și economice”*, 2015, nr.2(82), p.72-75.
2. YAMAMOTO, A., YAMAGUCHI, M., UEMURA, Ch. High conversion efficiency and high radiation resistance InP homojunction solar cells. In: *Appl. Phys. Lett.*, 1984, no44(6), p.611-613.
3. BOTHA, S., BHIMNATHWALA, H.G., PARAT, K.K., GHANDHI, S.K., BOREGO, J.M. Characterization and modeling of open tube diffused n^+p bulk InP solar cells. In: *19th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, New Orleans, La, May 4-8, 1987. New York, 1987, p.261-266.
4. MISTURY, S., YAMAMOTO, A., YAMAGUCHI, M., UEMURA, Ch. High-efficient InP solar cells with n^+p-p^+ structure growth by metalorganic chemical vapor deposition. In: *Jap. J. Appl. Phys.*, 1985, vol.24, no.9, p.1243-1244.

Notă: *Lucrarea a fost îndeplinită cu suportul Proiectului instituțional 15.817.02.34A*

Prezentat 29.09.2016