

## RECEPTORI DE RADIAȚIE PE FILME MONOCRISTALINE DE InSe

Igor EVTODIEV

Catedra Meteorologie, Metrologie și Fizică Experimentală

In this work the possibility of elaboration of the radiation receptors based on InSe is demonstrated. Particularly the roentgen resistors, spectral and polarizational photoresistors based on layered InSe are studied. The doping of the InSe crystals with 0.1%at. of Cu leads to the growth of  $\sim 8$  time of the photosensitivity in the UV region ( $h\nu > 3,0$  eV) comparing to the InSe photoresistor. None equilibrium charge carriers in the photoresistor based on monocrystalline InSe is recombining through two recombinatory levels with live times  $\tau_1 = 30 \cdot 10^{-5}$  s,  $\tau_2 = 9,2 \cdot 10^{-5}$  s. In the InSe with 0.1%at. Cu photoresistor photocurrent in the dark is decreasing accordingly to a single exponent with characteristic time  $1,12 \cdot 10^{-14}$  s. Compounds of type InSe that are strongly mechanic and optic anisotropic and doped with Cu and Cd are serving as base for the preparation of the photoreceptors with polarizational sensibility with narrow spectral band.

From the dependences of the intensity of the currents depending of the X radiation dose in the probes InSe< Cd 0,05 % at.> is observed a sublinear tendency for I-U characteristics, which indicates a growth of the concentration of the defects in the InSe crystals together the the growth of the radiation dose. The formation process of the defects is an inertial one and for the InSe<Cd> is reaching a stationary size during  $\sim 30 \div 35$ s.

## Introducere

Monocristalele InSe aparțin la clasa semiconductorilor stratificați cu conductivitate electrică mixtă (ionică-electronică) [1,2]. Fiind un semiconductor cu bandă optică indirectă egală cu 1,29 eV la  $T=293$  K, InSe se consideră un material efectiv pentru elaborări optoelectronice [3,4], în dispozitivele opticii neliniare [5], acumulatori de energie cu electrolit solid [6].

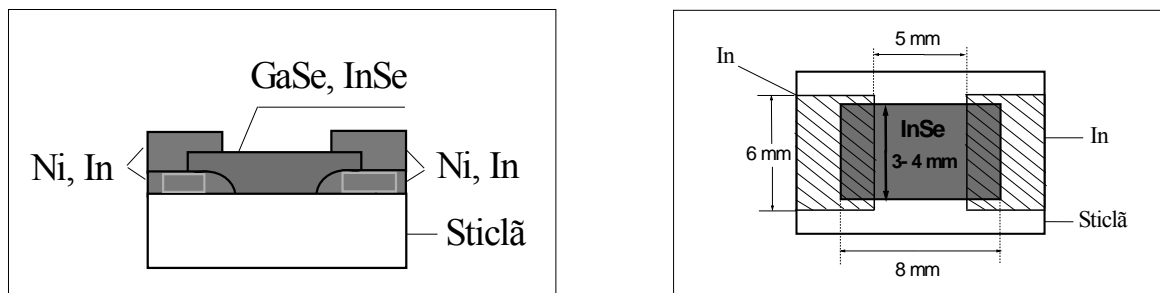
În [7] se studiază fotopleocroismul structurilor din InSe cu strat de oxid pe suprafața paralelă la axa cristalografică  $C_6$ , coeficientul de fotopleocroism al structurii  $In_2O_3$ -InSe la lungimea de undă a laserului He-Ne (632,8 nm) fiind de  $\sim 90$  %. Aceste proprietăți clar se manifestă pentru fasciculele de lumină orientate de-a lungul suprafețelor împachetărilor stratificate.

Proprietățile optice ale cristalelor InSe au fost intens cercetate prin intermediul: absorbției optice la marginea benzii intrinseci și IR, fotoconductivității, din care s-a stabilit lărgimea benzii interzise egală cu 1,353 eV la temperatura 1,6 K [8], s-a determinat energia de legătură a excitonilor de 15 meV [8,9]. Marginea benzii de absorbție fundamentală este formată de excitonii direcți care se evidențiază în spectrele de absorbție [10], fotoconductivitate [11] și mult mai pronunțat în spectrele de fotoluminescență la temperaturi joase [12]. Cadmiul creează în banda interzisă a cristalelor de InSe starea acceptorie adâncă, care în concentrație de 0,05% îndeplinește funcția de compensator. Conductivitatea electrică a cristalelor de InSe: Cd la  $T=293$  K, folosite la fabricarea rentgenorezistorilor, a fost de  $\sim 8 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$ .

## Metodica experimentului

Monocristalele de p-InSe au fost obținute prin metoda Bridgman-Stockbarger din componente elementare In și Se cu puritatea 99,999% luate în cantități stoichiometrice. Sinteza compusului primar cu Cd (0,1 % at.), folosit ca dopant, s-a efectuat în fiole de cuarț, a căror suprafață interioară a fost carbonizată.

Din monocristale masive de InSe, InSe: Cd (0,05 % at.) și InSe: Cu (0,10 % at. și 0,20 % at.) au fost obținute, prin despicare, plăci plan paralele de forma unui paralelogram cu aria suprafeței  $3 \times 8$  mm<sup>2</sup> și grosimi cuprinse în limitele  $1 \div 10$   $\mu$ m. Plăcile din InSe cu dimensiuni determinate și optic omogene, fără deformații mecanice, se lipesc pe suporturi din sticlă, pe a cărei suprafață au fost depuse straturi subțiri din In. StratURI identice după dimensiuni din același metal se depun și pe suprafața exterioară a plăcilor din semiconductor (Fig.1). Straturile din metal (In) îndeplinesc funcția de electrozi la care se aplică câmpul electric exterior.



**Fig.1.** Geometria electrozilor din metal (In) depuși respectiv pe mostrele din InSe. Dimensiunile electrozilor și ale eșantioanelor lipite pe suporturi din sticlă sunt indicate în mm.

Pentru confecționarea receptorilor de radiații din monocristale masive au fost despicat plăci de InSe cu grosimea de  $1,5 \div 2,5$  mm pe ale căror suprafețe oglindite au fost depuși prin evaporare termică electrozi din In. Pentru a mări adhezia stratului subțire din In, probele au fost tratate termic la temperatura  $\sim 450$  K în vid timp de  $\sim 10 \div 15$  min.

Pentru generarea fascicului focalizat de radiația X la distanță mică ( $\sim 5$  cm) s-a folosit instalația de tipul URS-0.02 cu tub electronic BSM1 și anticatod din Cu. Tensiunea de accelerare a fascicului de electroni a fost de 40 kV. Roentgenrezistorul din InSe<Cd> a fost alimentat de la o sursă de curent continuu de tipul B5-50. Tensiunea de alimentare a probei a fost de 20 V. Intensitatea curentului în circuit a fost înregistrată cu ajutorul electrometrului de tipul U5-6. Rezistența de sarcină fiind egală cu  $1 \text{ G}\Omega$  în lipsa radiației X (Fig.6, curba 1).

## Rezultate experimentale

### Fotorezistor pe bază de InSe

În Figura 2 sunt prezentate caracteristicile spectrale ale fotocurentului raportat la numărul de fotoni incidenți la temperatura 293 K a fotorezistorilor din InSe (curba 1), InSe:Cu 0,1 % at. (curba 2), InSe:Cu 0,2 % at. (curba 3) și InSe:Cd 0,05 % at. (curba 4). Banda de fotosensibilitate este localizată în intervalul de la marginea benzii de absorbție fundamentală până la 5,4 eV. Marginea de sensibilitate de la energii mari este determinată de caracteristicile sursei de lumină (lampa Xe 130 Wt).

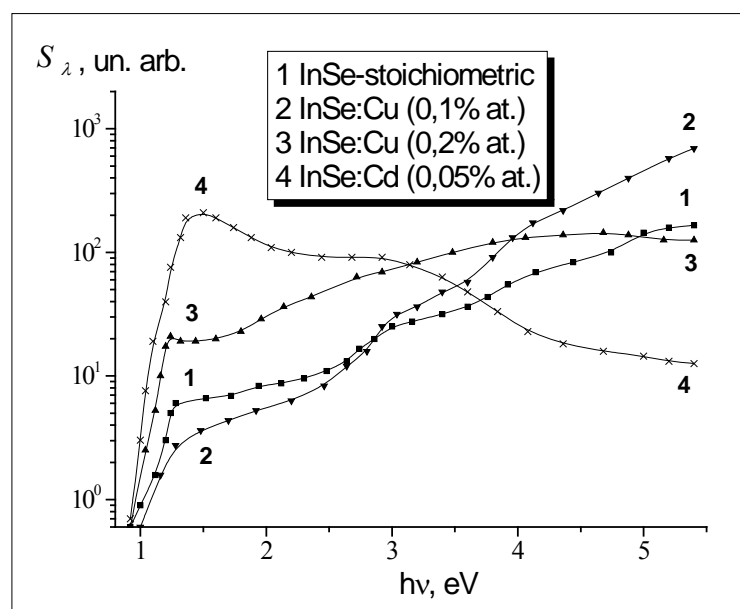


Fig.2. Caracteristicile spectrale ale fotorezistorilor pe bază de InSe special nedopați (1) și dopați cu Cu (2,3) și Cd (4).  $T = 293$  K.

Fotocurentul în fotorezistorii de InSe, InSe:Cu este în creștere odată cu energia pe tot intervalul spectral de sensibilitate. Doparea cristalelor de InSe cu 0,1 % at. de Cu conduce la majorarea fotosensibilității în regiunea UV ( $h\nu > 3,0$  eV) față de fotorezistorul InSe de  $\sim 8$  ori. Dacă în regiunea vizibilă fotosensibilitatea dispozitivelor InSe este ceva mai mică decât a fotorezistorului InSe:Cu (0,05 % at.), atunci la energii  $h\nu > 3,0$  eV acestea sunt superioare după fotosensibilitate.

Caracteristicile lux-amperece, la iluminare cu fascicul de lumină de la o sursă cu filament la temperatura 2850 K, poartă un caracter liniar până la  $\sim 1200 \div 1400$  Lx.

În Figura 3 a, b sunt prezentate, respectiv, curbele de relaxare a fotocurentului la iluminarea fotorezistorilor InSe, InSe<Cu> cu impulsuri de lumină cu spectru continuu în intervalul spectral  $250 \div 850$  nm (lampa Xe; ISS 100-3) cu durata de  $\sim 1,2 \cdot 10^{-6}$  s. Curbele de relaxare atât pentru fotorezistorul de InSe, cât și pentru eșantioanele pe bază de InSe:Cu se descriu bine cu o funcție de tipul  $I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$  (1), unde  $I_0$  este intensitatea fotocurentului în momentul întreruperii iluminării ( $t=0$ ), iar  $\tau$  este timpul de viață al purtătorilor de sarcină de neechilibru.

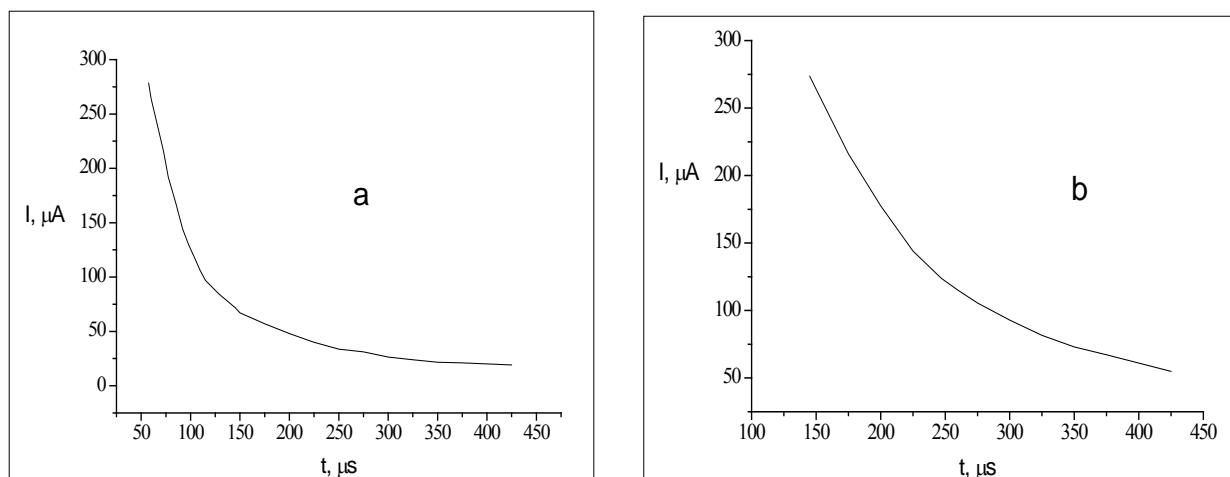


Fig.3. Curba de relaxare a fotocurentului prin fotorezistorul de InSe (a) și de InSe<Cu 0,2 % at.> (b) la T=293K. Durata impulsului de lumină albă este de  $\sim 1,2 \cdot 10^{-6}$ s.

În Figura 4 sunt prezentate caracteristicile  $\ln(I = f(t))$  pentru fotorezistorul InSe (linia 1) și InSe 0,1 % at. Cu. După cum se vede, purtătorii de sarcină de neechilibru în fotorezistorul pe bază de InSe monocristalin recombinează prin intermediul a două niveluri de recombinare cu timpuri de viață  $\tau_1 = 30 \cdot 10^{-5}$ s,  $\tau_2 = 9,2 \cdot 10^{-5}$ s. În fotorezistorul de InSe 0,1 % at. Cu fotocurentul la întuneric se micșorează după o singură exponență cu timpul caracteristic de  $1,12 \cdot 10^{-4}$ s.

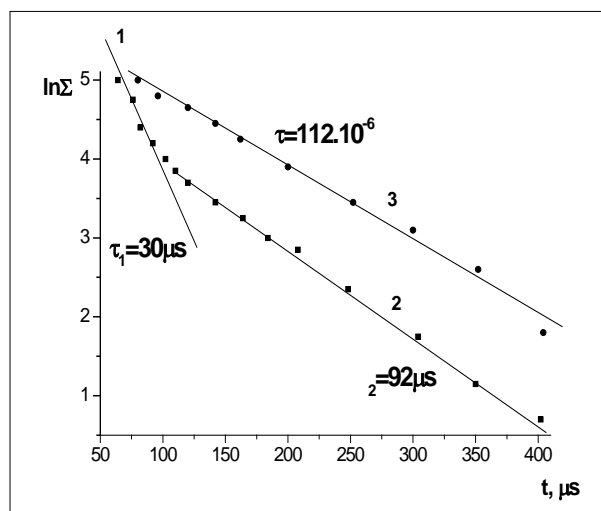


Fig.4. Caracteristicile  $\ln(I = f(t))$  : 1- InSe (linia 1) și InSe 0,1 % at. Cu.

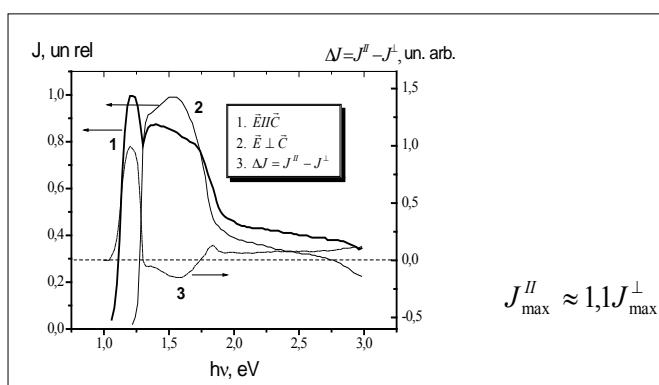
Tabel

Caracteristicile mediate ale dispozitivelor de laborator testate

Tipul fotorezistorului	$\Delta\lambda, nm$	$\lambda_{max}, nm$	U, V	$R_{intuneric}, k\Omega$	$\tau, s$
InSe	230÷1000	$\geq 230$	10	240	$3,0 \cdot 10^{-5}$ , $9,0 \cdot 10^{-5}$
InSe 0,1 % Cu	230÷1000	270		220	$6,0 \cdot 10^{-5}$
InSe 0,2 % Cu	230÷1000	780		170	$1,1 \cdot 10^{-4}$
InSe 0,05 % Cd	230÷1000	$\geq 230$		520	$8,1 \cdot 10^{-4}$

În Figura 5 sunt prezentate caracteristicile spectrale ale densității fotocurentului în polarizația  $\vec{E} \parallel \vec{C}$  și  $\vec{E} \perp \vec{C}$  (curbele 1 și 2, respectiv) și fotosensibilitatea  $I_{\parallel} - I_{\perp}$  pentru un fotorezistor din InSe dopat cu 0,5 % at. de Cd. Marginea benzii de fotosensibilitate în polarizarea  $\vec{E} \parallel \vec{C}$  este deplasată față de  $\vec{E} \perp \vec{C}$  spre energii

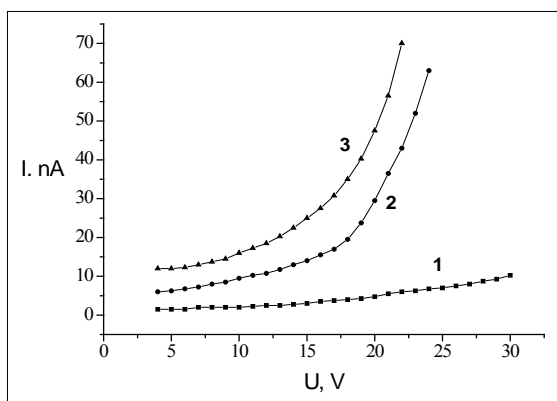
mici. Receptorii fotorezistivi pe bază de monocristale de InSe în geometria  $\vec{k} \perp \vec{C}$  au o bandă de fotosensibilitate relativă îngustă  $\sim 0,5$  eV atât în polarizația  $\vec{E} \parallel \vec{C}$ , cât și pentru  $\vec{E} \perp \vec{C}$ . Micșorarea rapidă a fotocurentului la energii  $h\nu > 1,7$  eV este consecința unei densități mari de stări de suprafață cu timp scurt de viață prezente pe secțiunile paralele la axa cristalografică  $C_6$ . Banda de fotosensibilitate polarizațională pe InSe este localizată în regiunea marginii benzii de absorbție fundamentale a acestor materiale. Lățimea benzii de fotosensibilitate polarizațională la  $\frac{1}{2} J_{\max}$  este de ordinul de  $\sim 0,2$  eV. Așadar, compușii puternic anizotropi mecanic și optic de tipul InSe nedopați și dopați cu (Cu și Cd) servesc ca bază pentru confecționarea fotoreceptorilor cu sensibilitate polarizațională cu bandă spectrală îngustă. Întrucât anizotropia caracteristicilor optice ( $n, k$ ) se păstrează și în șirul de soluții solide, pe baza acestor materiale pot fi fabricați fotoreceptori polarizaționali selectivi pentru regiunea vizibilă și IR apropiată a spectrului.



**Fig.5.** Caracteristica spectrală a densității fotocurentului în InSe<Cd 0,5 % at.> raportat la numărul de fotoni la polarizarea  $\vec{E} \parallel \vec{C}$  (curba 1) și  $\vec{E} \perp \vec{C}$  (curba 2) și diferența fotocurenților  $J^{\parallel} - J^{\perp}$  în funcție de energia fotonilor (curba 3).

În Figura 6 sunt prezentate caracteristicile I-U și la iradierea probelor de InSe<Cd> cu radiația  $CuK_{\alpha}$  ( $\lambda = 1,514$  Å, intensitatea curentului în tub  $\sim 0,16$  mA, tensiunea de accelerare a electronilor  $\sim 40$  kV) (curba 2) și la iradierea probei InSe<Cd> cu radiația  $CuK_{\alpha}$  I=0,30 mA, U=40 kV (curba 3).

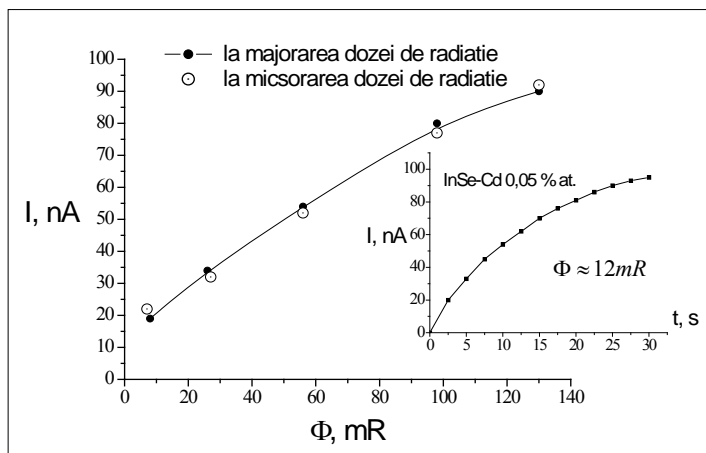
În lipsa radiației, caracteristicile I-U pentru tensiuni mici de alimentare a roentgenrezistorilor de InSe<Cd> practic sunt liniare atât în lipsa radiației X (curba 1), cât și la iluminarea probelor cu radiație (curbele 2 și 3). Creșterea supraliniară a intensității curentului în funcție de tensiunea de alimentare a probei indică la amplificarea purtătorilor de sarcină generați de radiațiile ionizante în probă.



**Fig.6.** Caracteristicile I-U la temperatura normală pentru roentgenrezistorii de InSe<Cd:0,05 % at > (curba 1- în lipsa radiației X și, respectiv, curbele 2 și 3 la iradierea probelor cu radiația  $CuK_{\alpha}$ ) ( $\lambda = 1,514$  Å, tensiunea de accelerare a electronilor U=40 kV, intensitatea curentului în tub I=0,16 mA, respectiv, 3,0 mA). Rezistența de sarcină - 1 GΩ în lipsa radiației X (curba 1). T = 293 K.

În Figura 7 sunt prezentate dependențele intensității curentului în funcție de doza radiației X în probele de InSe<Cd 0,05 % at.>. După cum se vede, caracteristicile I-U sunt subliniare, ceea ce indică la mărirea concentra-

ției defectelor în cristalele de InSe odată cu majorarea dozei de radiație. Procesul de formare a defectelor este unul inerțial și atinge, pentru probele de InSe<Cd>, mărimea staționară în timp de  $\sim 30\div 35$  sec (montajul din Fig.7).



**Fig.7.** Dependenta intensității curentului în roentgenrezistorii de InSe<Cd:0,05 % at.> ( $U_{\text{alim}}=20\text{V}$ ,  $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1,514 \text{ \AA}$ , intensitatea curentului în tub  $I=0,15 \text{ mA}$ , tensiunea de accelerare a electronilor  $U=40 \text{ kV}$  la  $T = 293 \text{ K}$ .

Montaj: Relaxarea roentgencurentului în funcție de timp la iradierea probei cu radiația X Cu K $\alpha$  (doza  $\sim 12 \text{ mR}$ ).

### Concluzii

√ Receptorii fotorezistivi pe bază de monocristale de InSe în geometria  $\vec{k} \perp \vec{C}$  au o bandă de fotosensibilitate relativ îngustă  $\sim 0,5 \text{ eV}$  atât în polarizația  $\vec{E} \parallel \vec{C}$ , cât și pentru  $\vec{E} \perp \vec{C}$ .

√ Micșorarea rapidă a fotocurentului la energii  $h\nu > 1,7\text{eV}$  este consecința unei densități mari de stări de suprafață cu timp scurt de viață prezente pe secțiunile paralele la axa cristalografică  $C_6$ . Banda de fotosensibilitate polarizațională pe InSe, analogic cu fotorezistorii pe GaSe, este localizată în regiunea marginii benzii de absorbție fundamentale a acestor materiale. Lățimea benzii de fotosensibilitate polarizațională la  $\frac{1}{2} J_{\text{max}}$  este de ordinul de  $\sim 0,2 \text{ eV}$ . Așadar, compușii puternic anizotropi mecanic și optic de tipul GaSe și InSe nedopați și dopați cu Cu, Cd pot fi recomandați pentru confecționarea fotoreceptorilor cu sensibilitate polarizațională cu bandă spectrală îngustă. Întrucât anizotropia caracteristicilor optice ( $n$ ,  $k$ ) se păstrează și în șirul de soluții solide, pe baza acestor materiale pot fi fabricați fotoreceptori polarizaționali selectivi pentru regiunea vizibilă și IR apropiată a spectrului.

√ Odată cu majorarea dozei de radiație X, caracteristicile I-U devin subliniare, ceea ce indică la mărirea concentrației defectelor în cristalele de InSe. Procesul de formare a defectelor este unul inerțial și atinge, pentru probele de InSe<Cd>, mărimea staționară în timp de  $\sim 30\div 35$  sec.

### Referințe:

1. Segura A., Wunstei K. and Chevy A. Appl. Phys. A 31 (1983) 139.
2. C.De.Biasi, Mieocci G., Rizo A., Tepore A., Cryst S. Growth 75 (1982) 482.
3. Martiner-Pastar J., Segura A., Valdes J.L. and Chevy A. J. Appl. Phys. 62 (1987) 1477.
4. Shgetomi A. and Kari T.I. J. Appl. Phys. 88 (2000) 1520.
5. Eckhoff W.C., Putnam R.S., Wang S., Curl R.F. and Tittes F.K. Appl. Phys. B. 63 (1966) 487.
6. Gomes de Costa P., Balkanski M. and Wallis R.F. Phys. Rev. B 43 (1991) 7066.
7. Катеринчук В.Н., Ковалюк М.З. Фотолеохроизм диодных структур оксид-p-InSe // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т.23. - №10. - С.1-3.
8. Hosan T., Kumar N., Sharma B.L. and Warrer A.V.R. Ind. J. Pure Appl. Phys. 16(1978) 575.
9. Camessel J., Merle P., Mathieu H. and Chevy A. Phys Rev 17 (1978) 4718.
10. Caraman M.I., Mushinskii K.M., Mushinskii V.P. Журнал-прикладной спектроскопии, 2b (1) 1977 108.
11. Blossi C. De., Micocci C., Rizzo A. and Tepore A. Phys. Stat. Solidi A 74 (1982) 291.
12. Gnatenco Iu.P. and Zirko Iu.I. B 142 (1987) 595.

Prezentat la 30.04.2009