Electroluminescence “ à 1 eV ” des diodes laser D.H. GaAs/(Ga, Al)As

F. Voillot, J.C. Brabant, J. Barrau, M. Brousseau, N. Mandi, J. Mazzaschi,
J.C. Bouley

► To cite this version:

F. Voillot, J.C. Brabant, J. Barrau, M. Brousseau, N. Mandi, et al.. Electroluminescence “ à 1 eV ” des diodes laser D.H. GaAs/(Ga, Al)As. *Revue de Physique Appliquée*, 1980, 15 (3), pp.717-723. 10.1051/rphysap:01980001503071700 . jpa-00244781

HAL Id: jpa-00244781

<https://hal.science/jpa-00244781>

Submitted on 1 Jan 1980

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

42.80 — 78.60 — 71.55

Electroluminescence « à 1 eV » des diodes laser D.H. GaAs/(Ga, Al)As (*)

F. Voillot, J. C. Brabant, J. Barrau, M. Brousseau, N. Mandi, J. Mazzaschi

Laboratoire de Physique des Solides (**),

I.N.S.A., Département de Physique, avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex, France

et J. C. Bouley

C.N.E.T., 196, route de Paris, 92220 Bagneux, France

Résumé. — Nous étudions la bande d'électroluminescence des diodes laser à double hétérostructure GaAs/(Ga, Al)As située au voisinage de 1 eV à la température ambiante. Nous montrons que la bande d'électroluminescence comprend trois raies à 77 K : une est attribuée à la zone active et une au substrat.

Abstract. — We study the electroluminescence of laser diodes GaAs/(Ga, Al)As. The I.R. band, located near 1 eV at room temperature, has three components at 77 K. One of them incomes from the active layer, another is emitted by the substrate.

1. Introduction. — L'explication de la dégradation lente des diodes ou des lasers à double hétérostructure GaAs/(Ga, Al)As en fonctionnement peut être recherchée dans l'évolution des centres profonds, spécialement dans la zone active [1, 2, 3]. Cependant la structure compliquée des lasers rend difficile l'observation des centres profonds dans cette zone.

La technique utilisant les transitoires de capacité (D.L.T.S.) a été utilisée par Lang *et al.* [1, 2] puis par un certain nombre d'autres auteurs [3, 4, 5]. Le souci d'une interprétation simplifiée exige souvent dans ce cas la construction de dispositifs spéciaux, dans lesquels par exemple la zone active est généralement moins dopée que dans le dispositif réel [3, 4]. Malgré cela les auteurs s'accordent pour reconnaître une incertitude quant à la localisation des défauts repérés dans la structure. Lang *et al.*, étudiant des diodes lasers D.H. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, détectent ainsi un centre caractérisé par une énergie d'activation thermique de 0,89 eV qu'ils associent au bombardement protonique du matériau ; ces auteurs suggèrent qu'il pourrait s'agir du centre E3 observé également dans GaAs après bombardement aux électrons de 1 MeV.

La spectroscopie de la lumière spontanée émise par la face contenant le miroir de sortie du laser a été effectuée par quelques auteurs [6, 7, 8, 9]. Il y a accord

sur l'observation d'une large bande pointant au voisinage de 1,0 eV à la température ambiante mais il y a divergence quant à sa signification.

H. Imai [8] observe que la vitesse de la dégradation est égale à celle de l'accroissement d'intensité de luminescence à 1,0 eV ; S. Metz [7] ainsi que J. P. Van der Ziel et R. L. Hartman [9] qui n'ont pas fait d'étude systématique de la dégradation lente mentionnent cependant certaines constatations d'évolutions opposées [7] ou de non-corrélation [9] des deux phénomènes.

H. Imai [8] tire de son observation argument pour indiquer que la luminescence à 1,0 eV est émise par la zone active du laser. S. Metz [7] effectue une exploration de la face portant le miroir au moyen d'une optique à 2 μm de résolution et observe que la lumière à 1,0 eV est émise seulement par la zone active. J. P. Van der Ziel et R. L. Hartman [9] effectuent le même genre d'exploration et observent que la lumière à 1,0 eV est émise seulement par le substrat du laser !

S. Metz [7] note que la position de cette bande à 1,0 eV ne dépend pas de la composition en aluminium dans la zone active et en tire argument pour en attribuer l'origine au centre E3, l'écart énergétique entre position optique et position D.L.T.S. étant attribuable à un déplacement de Franck-Condon. J. P. Van der Ziel et R. L. Hartman reprennent cette proposition.

Pour notre part, nous avons également observé la présence de la *luminescence* à 1,0 eV dans le spectre d'électroluminescence à température ambiante des lasers à double hétérostructure GaAs/(Ga, Al)As réalisés par épitaxie liquide, selon les dopages et la

(*) Conférence présentée au Congrès de la Société Française de Physique (Toulouse).

(**) Associé au C.N.R.S.

Fig. 1. — Coupe d'une diode laser à double hétérostructure GaAs/(Ga, Al)As. Les épaisseurs des couches sont indiquées en μm et les densités en cm^{-3} . (Ga, Al)As(n) : $x = 0,4$; (Ga, Al)As(p) : $x = 0,5$.

[Section of a laser diode. The units are μm and cm^{-3} for layers depth and carrier densities. (Ga, Al)As(n) : $x = 0.4$; (Ga, Al)As(p) : $x = 0.5$.]

géométrie indiqués figure 1. Il faut noter que les techniques fondées sur la stimulation thermique des courants ou capacités de jonction pratiquées en vue de renseigner sur la zone active sont inadaptées à de telles structures. Nous avons orienté notre expérience non pas vers la résolution spatiale mais vers la résolution en énergie de la luminescence et avons fait une analyse en refroidissant les dispositifs jusqu'à 77 K. A basse température, nous avons séparé trois raies dans le spectre d'émission infrarouge, ce qui démontre déjà que plusieurs défauts — ou tout au moins plusieurs transitions — sont impliqués. Nous comparons le spectre d'électroluminescence au spectre de photoluminescence du substrat GaAs des lasers. Nous avons examiné, mais cependant pas encore systématiquement, l'effet de la dégradation produite par un fonctionnement de longue durée, activé par un échauffement du dispositif à 70 °C. Notre conclusion principale est que l'électroluminescence infrarouge des diodes lasers étudiées est la superposition de signaux provenant de la zone active et du substrat : les conditions expérimentales telles que qualité du laser, température, courant électrique, déterminent la part relative de chaque composante.

2. « L'émission à 1 eV » : composition et origine géométrique. — 2.1 LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL. — Le laser est excité par un courant modulé à 300 Hz, d'amplitude comprise entre 10 et 50 mA — ce qui

correspond à une densité d'injection de 0,2 à 1 kA cm^{-2} dans la zone active. La face substrat GaAs est parallèle à la face d'entrée du monochromateur et placée en regard ; ainsi l'image du *stripe* est formée sur la fente d'entrée du monochromateur au moyen d'une lentille simple ; une ouverture ($50 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$) a été réalisée dans le contact électrique Au-Ge pris sur le substrat. Le système de détection et d'analyse du signal est constitué par un détecteur PbS refroidi et une détection synchrone. Cette géométrie favorise la collection de la lumière.

2.2 « L'ÉMISSION A 1 eV ». — La figure 2 présente le spectre d'électroluminescence d'un dispositif placé en bon contact thermique avec un support porté à trois températures différentes entre 77 et 300 K.

Fig. 2. — Spectres d'électroluminescence pour la diode laser b de la série, relevés à différentes températures.

[Electroluminescence spectra of laser diode b recorded at different temperatures.]

Tous les échantillons étudiés présentent la similitude suivante : une bande d'émission pointant à 1,0 eV à 300 K et trois raies d'émission pointant à 1,03, 1,13, 1,20 eV à 77 K. Les échantillons diffèrent par l'amplitude relative des raies à basse température ainsi que par l'importance de la luminescence à 1 eV relativement à la luminescence associée à la recombinaison bande à bande (toujours intense et non rapportée sur les figures). De plus, pour un dispositif dont le support est à température fixe, l'amplitude relative des pics dépend de l'intensité du courant, comme le montrent les figures 3a et 3b.

Fig. 3a. — Spectres d'électroluminescence de la diode h à 82 K correspondant à des courants excitateurs de différentes intensités.
[Electroluminescence spectra of the laser diode (h) recorded for different forward currents.]

Fig. 3b. — Spectres d'électroluminescence de la diode (b) à 82 K correspondant à des courants excitateurs de différentes intensités.
[Electroluminescence spectra of the laser diode (b) recorded for different forward currents.]

2.3 L'ORIGINE GÉOMÉTRIQUE DE « L'ÉMISSION A 1 eV ». — L'injection des porteurs hors d'équilibre dans la zone active produite par le passage du courant provoque les transitions radiatives qui mettent en jeu les centres profonds ainsi que les transitions radiatives bande à bande dans cette zone. Cette luminescence bande à bande constitue, nous semble-t-il, la seule source efficace d'excitation du restant de la structure : compte tenu de sa composition spectrale elle est apte à produire des paires électron libre-trou libre dans le GaAs et tout particulièrement dans le substrat. La question qui se pose est donc de savoir si cette excitation secondaire est susceptible d'induire une recombinaison radiative sur les centres profonds du substrat significative et laquelle le cas échéant. En vue de répondre, nous avons étudié les propriétés de photoluminescence du substrat de chaque laser ainsi que l'effet du vieillissement par fonctionnement sur le spectre d'électroluminescence pour quelques lasers.

Sur la figure 4a nous avons reporté le spectre de photoluminescence réalisé sur le substrat de la diode laser h à 300 K au moyen de l'excitation par la raie à 0,75 μm d'un laser à krypton (courbe 2). Les spectres acquis de la même façon sur d'autres diodes sont très ressemblants et pour cette raison ne sont pas rapportés : ils sont essentiellement caractérisés par un pic principal pointant à $1,01 \pm 0,01$ eV et un pic secondaire à $0,95 \pm 0,01$ eV. Sur cette même figure nous avons reporté le spectre d'électroluminescence de la

Fig. 4a. — Spectres d'électroluminescence (1) et de photoluminescence du substrat (2) de la diode laser (h) à 300 K. La courbe (3) représente le spectre de photoluminescence de la couche épitaxiale GaAs(p) extrême à 300 K.

[Electroluminescence (1) and photoluminescence of the substrate (2) corresponding to the laser diode (h). We have also reported the photoluminescence of the top GaAs(p : Ge) epilayer at 300 K (curve 3).]

même diode h à 300 K (courbe 1). Il se caractérise par une bande pointant à 1,0 eV. Les spectres très ressemblants acquis sur les autres diodes ne sont pas rapportés. La courbe 3 de la figure 4a correspond à la photoluminescence d'une plaquette ayant subi les épitaxies successives représentées sur la figure 1, éclairée par la raie à 0,75 μm sur la *face supérieure* de la figure 1. Elle représente donc essentiellement le spectre d'émission de la dernière couche épitaxiée GaAs(P⁺ : Ge).

Sur la figure 4b, les courbes 2, 1, 3 représentent encore la photoluminescence du substrat du laser h, l'électroluminescence du laser h, la photoluminescence d'une couche terminale épitaxiée GaAs(P⁺ : Ge). Les expériences sont faites à basse température (82 K, 77 K, 77 K respectivement). La photoluminescence du substrat est essentiellement caractérisée par un pic principal pointant à $1,20 \pm 0,01$ eV et un pic secondaire à $0,95 \pm 0,01$ eV. Le spectre d'électroluminescence est caractérisé par la prééminence du pic pointant à 1,03 eV et deux autres pics à 1,13 eV et 1,20 eV. Le spectre de photoluminescence de la couche épitaxiale terminale est semblable à celui du substrat pour les énergies inférieures à 1,20 eV mais il croît de façon monotone jusqu'à l'émission bande à bande au-dessus de 1,20 eV.

Il y a similitude entre les trois spectres acquis à la

Fig. 4b. — Spectres d'électroluminescence (1) et de photoluminescence du substrat (2) de la diode laser (h) à 77 K. La courbe 3 représente le spectre de photoluminescence de la couche épitaxiale GaAs(p) extrême à 77 K.

[Electroluminescence (1) and photoluminescence of the substrate (2) corresponding to the laser diode (h). We have also reported the photoluminescence of the top GaAs(p : Ge) epilayer at 77 K (curve 3).]

température ambiante (Fig. 4a). Seulement deux détails les distinguent : une raie relativement peu intense à 0,95 eV sur les spectres de photoluminescence ; un épaulement généralement à peine perceptible à 1,06 eV sur le spectre d'électroluminescence.

La comparaison des trois spectres acquis à la température de l'azote liquide peut être faite dans les deux régions suivantes :

(i) $h\nu < 1,20$ eV. Les spectres de photoluminescence se ressemblent et le spectre d'électroluminescence est toujours différemment typé : il y a là un important indice pour suggérer que la marque principale (à 1,03 eV) des spectres d'électroluminescence ne provient pas des couches GaAs extrêmes et est donc imposée par la zone active plus fortement excitée.

(ii) $h\nu \gtrsim 1,20$ eV. Le spectre d'électroluminescence ressemble au spectre de photoluminescence du substrat tandis que le spectre de photoluminescence de la dernière couche GaAs(P) se distingue. Il y a des raisons pour expliquer la différence de propriétés entre les zones GaAs extrêmes sur lesquelles nous reviendrons plus loin. Il y a incertitude quant à l'origine géométrique de l'électroluminescence à 1,20 eV : il est possible de la situer dans le substrat ou dans la zone active.

Revenons plus attentivement à l'analyse des spectres d'électroluminescence à basse température en fonction du niveau de courant excitateur : à propos de deux diodes, les figures 3a et 3b illustrent la situation généralement rencontrée. Deux constatations peuvent être faites :

(i) La raie à 1,20 eV croît plus vite que les raies à 1,03 et à 1,13 eV lorsque le courant augmente. Extrapolant chacune des raies à 1,03 et 1,20 eV, par assimilation à une gaussienne, il est possible de mesurer les intensités respectives pour tracer ensuite les courbes de la figure 5 : la règle observée est une relation quadratique ($\Phi(1,20 \text{ eV}) \sim \Phi^2(1,03 \text{ eV})$).

(ii) Un traitement de vieillissement accéléré sous courant $I = 90$ mA à 70 °C a montré que quelques diodes dont l'émission à 1,03 eV est relativement intense se sont dégradées très vite. En particulier, la diode b (cf. Fig. 3b) s'est dégradée de 6 % en 400 h tandis que la diode h (cf. Fig. 3a) ne montrait pas de changement très perceptible au bout du même temps (≈ 0 %). Dans ces expériences, le taux de dégradation était évalué d'après la décroissance de l'émission bande à bande mesurée à courant excitateur constant.

Ces deux constatations renforcent l'hypothèse suggérée plus haut par la comparaison des spectres de photo et d'électroluminescence.

Tout d'abord, la relation quadratique qui existe entre l'intensité de la raie à 1,20 eV et celle de la raie à 1,03 eV peut être comprise de la manière suivante. Selon l'importance relative des coefficients de capture (thermique plus optique) des électrons libres ou des

Fig. 5. — L'intensité maximum de la raie d'électroluminescence à 1,20 eV est proportionnelle au carré de l'intensité maximum de la raie d'électroluminescence à 1,03 eV. (Cas des diodes b et h à 82 K.)

[$\phi^2(1.03 \text{ eV})$ versus $\phi(1.20 \text{ eV})$ for the laser diodes b and h at 82 K. ($\phi(1.03 \text{ eV})$ and $\phi(1.20 \text{ eV})$ are the intensities at the peak of the corresponding electroluminescence line).]

trous libres par le centre responsable de la luminescence à 1,03 eV supposé localisé dans la zone active, on peut écrire :

$$a) \phi(1.03 \text{ eV}) = An, \quad Cp \gg Cn$$

$$b) \phi(1.03 \text{ eV}) = Bp, \quad Cn \gg Cp$$

de plus on a toujours :

$$\phi(b.b) \sim np = n(p_0 + n) = p(p - p_0).$$

(Ceci suppose un processus de recombinaison à une particule sur le centre profond.) $\phi(b.b)$ indique l'intensité de l'émission bande à bande spontanée dans la zone active et $\phi(1.03 \text{ eV})$ l'intensité de luminescence émise par la recombinaison radiative sur le centre profond correspondant. n et p sont les densités de porteurs libres et p_0 la densité de trous à l'équilibre thermique dans la zone active.

La luminescence à 1,20 eV supposée émise par le substrat sous l'effet de l'excitation par le rayonnement bande à bande spontané de la zone active a une intensité proportionnelle à la densité de porteurs

minoritaires créés, ce qui correspond à un régime de faible excitation :

$$\phi(1.20 \text{ eV}) \sim \phi(b.b). \quad (1)$$

On déduit donc, selon le cas initial :

$$a) \phi(1.20 \text{ eV}) \sim \phi_A(1.03 \text{ eV}) \times \phi(1.03 \text{ eV}) + \phi^2(1.03 \text{ eV})$$

ou bien

$$b) \phi(1.20 \text{ eV}) \sim -\phi_B(1.03 \text{ eV}) \times \phi(1.03 \text{ eV}) + \phi^2(1.03 \text{ eV}).$$

Nous avons posé

$$\phi_B(1.03 \text{ eV}) = Bp_0 \quad \text{et} \quad \phi_A(1.03 \text{ eV}) = Ap_0.$$

Le dernier terme l'emporte toujours lorsque la double injection devient effective ($n \simeq p_0$) : la relation quadratique observée (Fig. 5) s'accorde donc avec cette description pour les fortes excitations. Quant à la relation linéaire (1) on peut en voir la vérification sur la figure 6. Le fait que les courbes de la figure 5 se placent entièrement au-dessus de la droite passant par l'origine $\phi(1.20) \sim \phi^2(1.03)$ indique que le modèle *a* est le bon ($Cp \gg Cn$) et élimine donc le modèle *b*.

Enfin, l'influence de la densité des centres profonds sur la vitesse de dégradation des lasers est mieux compréhensible si ces centres sont localisés dans la zone active.

Fig. 6. — Intensité maximum de l'électroluminescence à 1,20 eV en fonction de l'intensité du pic d'électroluminescence bande à bande (cas des diodes b et h à 82 K).

[$\phi(1.20 \text{ eV})$ versus $\phi(b.b)$ for the laser diodes b and h at 82 K. ($\phi(b.b)$ is the intensity at the peak of the band to band line).]

3. L'interprétation des spectres à 77 K. — Notons préalablement l'évolution de la position des pics à 1,04 et 1,20 eV — relevée sur le spectre d'électroluminescence dans chaque cas — en fonction de la température (Fig. 7).

Fig. 7. — Energie de bande interdite (—), pic d'électroluminescence « à 1,20 eV » (0) ; pic d'électroluminescence « à 1,03 eV » (+) en fonction de la température.

[Band gap energy (—), « 1.20 eV » electroluminescence maximum (0) ; « 1.03 eV » electroluminescence maximum (+) versus temperature.]

Examinons d'abord la photoluminescence du substrat des lasers. Dans le domaine spectral 0,90 à 1,20 eV, trois raies sont très citées dans la littérature pour GaAs type n à 77 K : les positions sont 0,94 eV, 1,0 eV, 1,20 eV.

K. D. Glinchuk *et al.* [10] ont attribué la raie à 0,94 eV au complexe $V_{Ga}-V_{As}$.

La raie à 1,20 eV est attribuée aux complexes du type V_{Ga} -donneur [11, 12, 13]. Il est donc naturel de trouver la raie 1,20 eV dans la photoluminescence du substrat de GaAs type n fortement dopé au silicium : elle peut être attribuée dans ce cas au complexe $V_{Ga}-Si_{Ga}$.

Examinons ensuite la photoluminescence de la dernière couche épitaxiale GaAs(p^+ : Ge). La différence à 77 K par rapport au substrat s'observe pour $h\nu > 1,20$ eV. L'explication peut être trouvée dans la présence de nombreux complexes associant des lacunes d'arsenic et qui se manifestent par des bandes de luminescence larges.

Examinons enfin l'électroluminescence des lasers à 1,03 et 1,13 eV. Considérant maintenant que ce rayonnement provient de la zone active, mais qu'il traverse le substrat du laser avant d'être analysé, nous avons mesuré la transmission optique d'un substrat ayant subi les traitements thermiques habituels de fabrication des lasers — mais en l'absence des bains d'épitaxie. Ceci permet de corriger les spectres : les pics directement observés à 1,03, 1,13 eV sont en réalité émis à 1,04, 1,14 eV.

La proposition émise par S. Metz [7] d'attribuer la luminescence pointant à 1,0 eV à 300 K au centre E3 est fondée sur l'idée que ce centre a une position énergétique fixe par rapport à la bande de valence. Notre étude en température ne confirme pas un tel comportement. Il est possible d'examiner une autre hypothèse, celle de l'émission par un complexe dans lequel intervient le cuivre. C'est en effet une proposition souvent faite dans la littérature pour la raie à 1,0 eV. Glinchuk *et al.* [10] proposent le modèle donneur-accepteur : $V_{As}Cu_{Ga}$. Le mécanisme de diffusion du cuivre et le site final adopté par cet élément dans GaAs dépendent non seulement du type semiconducteur (n ou p) mais aussi du cycle thermique et de la stœchiométrie du bain : une étude de l'action de ces paramètres sur l'électroluminescence des lasers serait très utile. La source de cuivre peut très bien se situer dans le substrat : cet élément aurait alors suivi au cours de la croissance épitaxiale. En effet, si les courbes de photoluminescence du substrat ne révèlent pas de raie caractéristique du cuivre au-delà de 1,25 eV, il faut noter que dès 1,30 eV apparaît une forte émission qui peut masquer la marque de cet élément. D'autre part, le large épaulement observable entre 0,95 eV et 1,10 eV dans le spectre peut signaler une présence de cuivre.

Nous n'avons pas de proposition d'identification de la raie d'électroluminescence à 1,14 eV faiblement émise.

4. Conclusion. — Cette étude nous a montré que la bande d'électroluminescence à 1 eV des lasers à double hétérostructure GaAs/(Ga, Al)As fonctionnant à température ambiante évoluait vers trois raies distinctes au cours d'un refroidissement.

La comparaison avec les résultats acquis par photoluminescence sur le substrat du laser et sur la dernière couche épitaxiée GaAs(P) à 77 K, l'analyse de la croissance relative des raies d'électroluminescence avec le niveau de courant exciteur, l'observation de corrélations entre l'intensité de la raie d'électroluminescence à 1,03 eV et le phénomène de dégradation en fonctionnement, suggèrent que le signal d'électroluminescence infrarouge est généralement la superposition de signaux émanant de la zone active et du substrat. La température, le niveau de courant et la densité des centres présents dans la zone active sont déterminants pour fixer la contribution de l'un et de l'autre.

Cette dernière proposition permet de penser qu'il n'y a pas forcément incompatibilité entre les résultats expérimentaux de H. Imai, S. Metz, J. P. Van der Ziel et R. L. Hartman.

Acknowledgments. — Nous avons le plaisir de remercier les Laboratoires du C.N.E.T. de Bagneux qui ont élaboré les dispositifs.

Bibliographie

- [1] LANG, D. V., LOGAN, R. A. and KIMERLING, L. C., Proc. XIII Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, Rome (1976) 615.
 - [2] LANG, D. V., HARTMAN, R. L. and SCHUMAKER, N. E., *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 11, 4986.
 - [3] BALLAND, B., VINCENT, G., BOIS, D., HIRTZ, P., *Appl. Phys. Lett.* **34** (1979) 108.
 - [4] UJI, T., *Japan J. Appl. Phys.* **77** (1978) 4, 727.
 - [5] HENRY, C. H., DAPKUS, P. D., *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 4067.
 - [6] NEWMAN, D. H. and GODFREY, R. F., GOODWIN, A. R. and LOVELACE, D. F., *Appl. Phys. Lett.* **29** (1976) 6, 353.
 - [7] METZ, S., *Appl. Phys. Lett.* **33** (1978) 2, 198.
 - [8] IMAI, H., ISOZUMI, K., TAKUSAGAWA, M., *Appl. Phys. Lett.* **33** (1978) 330.
 - [9] VAN DER ZIEL, J. P., HARTMAN, R. L., *Appl. Phys. Lett.* **38** (1979) 520.
 - [10] GLINCHUK, K. D. and PROKHOROVICH, A. V., *Phys. Status Solidi (a)* **44** (1977) 777.
 - [11] GLINCHUK, K. D. and PROKHOROVICH, A. V., VOVNENKO, V. I., *Phys. Status Solidi (a)* **15** (1973) 287.
 - [12] ALFEROV, Zh. I., GARBUZOV, D. Z., MOROZOV, E. P. and TRET'YAKOV, N. D., *Sov. Phys. Semicond.* **1** (1968) 1410.
 - [13] WILLIAMS, E. W., *Phys. Rev.* **168** (1968) 922.
 - [14] WILLIAMS, E. W., BEBB, H. B., *Semiconductors and Semimetals*, ed. by WILLARDSON, R. R. and BEER, A. C., vol. **8**, p. 359.
 - [15] LANG, D. V., LOGAN, R. A., KIMERLING, L. C., *Phys. Rev. B* **15** (1977) 4874.
-