

# Ներքին թերմոառաձգական լարումները կիսահաղորդչային բազմաշերտ կառուցվածքներում

Գրիգորյան Գոհար  
Քոչարյան Վիլեն

**Հանգուցային բառեր.** առաձգական լարում, լեզիրացում, հետերոանցում, դեֆորմացիա, միատանցքանի ճնշում, էլեկտրոն-խոռոչ ռեկոմբինացիա, լազեր, ճառագայթման բնեռացվածություն

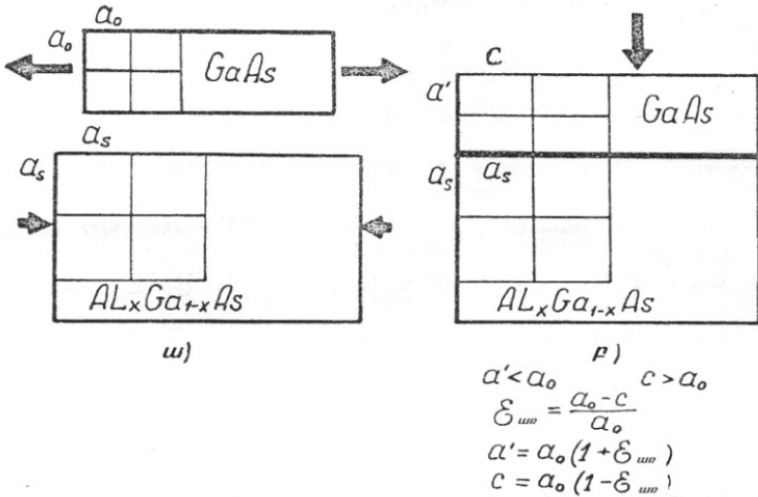
Կիսահաղորդչային սարքերում ներքին առաձգական լարումներ առաջանում են ինչպես կիսահաղորդիչները տարբեր խառնուրդներով լեզիրացման պրոցեսում, այնպես էլ տարբեր նյութերից հետերոանցումների պատրաստման ընթացքում: Ներկայումս կիրառվող բոլոր կիսահաղորդչային սարքերում (տարբեր տիպի դիոդներ, տրանզիստորներ, լուսարձակիչ սարքեր, միկրոսխեմաներ և այլն) լայնորեն օգտագործվում են մետաղ-կիսահաղորդիչ անցումները (օմական և ոչ-օմական կոնտակտներ), մետաղ-դիէլեկտրիկ-կիսահաղորդիչ (ՄՂԿ, ՄՕԿ) անցումները, տարբեր կիսահաղորդիչների միջև հետերոանցումները:

Անցման նյութերի ցանցի հաստատունների տարբերությամբ պայմանավորված՝ այդ նյութերում առաջանում են ներքին մեխանիկական լարումներ: Մեծ լարումները կարող են առաջացնել բյուրեղային ցանցի պարբերականության խախտումներ (օրինակ՝ դիսլոկացիաներ, միկրոճաքեր և այլն), իսկ փոքր լարումների դեպքում դրանք կլինեն առաձգական և կառաջացնեն բյուրեղային ցանցի սիմետրիայի կարգի փոփոխություն [6, 26; 7, 18]: Ներքին մեխանիկական մեծ լարումները կարող են նպաստել կիսահաղորդչային սարքերի արագ դեգրադացիային, իսկ փոքր լարումները կարող են էապես փոփոխել սարքերի բնութագրական պարամետրերը (էլեկտրական, օպտիկական և այլն):

Դիտարկենք համեմատաբար փոքր լարումների ազդեցությունները GaAs-AlGaAs հետերոանցման օրինակով: Քանի որ AlGaAs պինդ լուծույթներում ցանցի հաստատունը սենյակային ջերմաստիճանում մեծ է քան GaAs-ում, ապա GaAs-AlGaAs անցման տիրույթում GaAs-ը կկրի ձգման դեֆորմացիա անցման հարթությունով, իսկ AlGaAs-ը՝ սեղման [4, 66] (նկար 1ա): Որքան մեծ է AlGaAs շերտի հաստությունը, այնքան մեծ կլինի GaAs շերտում առաջացող դեֆորմացիան: Ընդհանուր դեպքում,  $Al_xGa_{1-x}As$ - $Al_yGa_{1-y}As$  անցման շերտերում ներքին լարումների մեծությունները և ուղղությունները կախված են այդ շերտերում Al քանակներից և այդ շերտերի հաստություններից: Այդ մեծությունների հարաբերակցություններից կախված՝  $Al_xGa_{1-x}As$  շերտը կարող է գտնվել ինչպես ձգված, այնպես էլ սեղմված վիճակում: Ձգման դեֆորմացիայից անցումը սեղման դեֆորմացիայի նկարագրվում է հետևյալ չափանիշով [4, 67], որում հաշվի է առնված անցման շերտերում Al քանակների հնարավոր փոփոխությունները՝

$$\frac{x_{cp}}{y_{cp}} > \frac{4 \frac{d}{l}}{\left(\frac{d}{l}+1\right)^2} \left(1 + \frac{y_0}{y_{cp}} \frac{d}{l}\right) \quad (1)$$

(1) քանաձևում  $x_{cp} = \frac{x_0 + x_1}{2}$ ,  $y_{cp} = \frac{y_0 + y_1}{2}$ ,  $x_0, x_1, y_0, y_1$  այլումիսի քանակություններն են  $d$  և  $l$  հաստություններով շերտերի սահմաններում:



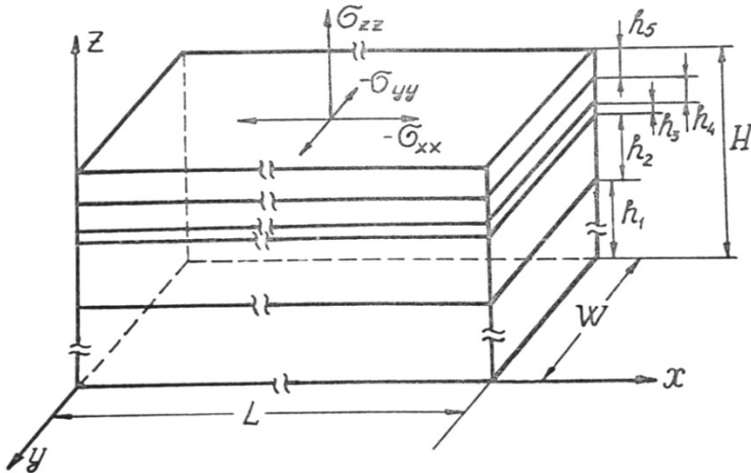
**Նկար 1. Գանգի պարամետրերի անհամապատասխանության հետևանքով ներքին լարումների առաջացումը (ա) և շերտերում տեղադրման շեղումները (բ):**

Շերտերի անցման հարթությամբ ներքին ձգման դեֆորմացիայի ազդեցությունը GaAs շերտում համարժեք է ուղղահայաց ուղղությամբ արտաքին միատանցք սեղման ազդեցությանը, իսկ  $Al_xGa_{1-x}As$  շերտում՝ ուղղահայաց ուղղությամբ արտաքին միատանցք ձգման ազդեցությանը (նկար 1բ):

Հաշվենք ցանցի հաստատունների տարբերություններով պայմանավորված ներքին թերմոառաձգական լարումները հնգաշերտ կառուցվածքներում, որոնք սովորաբար իրականանում են շատ կիսահաղորդչային սարքերում (օրինակ՝ լուսարձակիչ դիոդներում, լազերներում և այլն): Ընդունենք, որ անցման շերտերում նյութերի ցանցի հաստատունների տարբերությունները շատ մեծ չեն, այսինքն բյուրեղային ցանցի պարբերականության խախտումներ (դիսլոկացիաներ, միկրոձաքեր և այլն) չեն առաջանում: Այդ դեպքում ներքին լարումները կլինեն առաձգական և կառաջացնեն միայն բյուրեղային ցանցի սիմետրիայի կարգի փոփոխություն [1, 375; 7, 23]:

Տարբեր շերտերում ներքին լարումների բաշխվածության խնդիրը որոշելու համար օգտվում ենք այն փաստից, որ հեղուկ ֆազայից աճեցվող հետերոկառուցվածքներում, աճեցման շերտաստիճանում (մոտ  $800^\circ\text{C}$ -ում) բոլոր շերտերի ցանցի հաստատունները համընկնում են, և շերտերում ներքին լարումներն առաջանում են ստեցման պրոցեսում՝ շերտերի նյութերի գծային ընդարձակման գործակիցների տարբերության պատճառով [8, 2543]: Այս դեպքում լարվածության բաշխ-

ման խնդիրը իրենից ներկայացնում է ստանդարտ թերմոտաձգական խնդիր, որի լուծումը հանգում է ուղղանկյուն չորսուի դեֆորմացիայի խնդրին [2, 142] (նկար 2):



**Նկար 2. Շերտերում տարբեր գծային ընդարձակման գործակիցներով հնգաշերտ կառուցվածքի սխեման:**

Դիտարկենք նկ. 2-ում պատկերված ուղղանկյուն հատույթի բազմաշերտ կառուցվածքը՝ շերտերում փոփոխվող գծային ընդարձակման գործակցով, ընդ որում ենթադրենք, որ շերտերում ցանցի հաստատունները աճեցման տրված ջերմաստիճանում համընկնում են: Ջերմաստիճանի փոփոխման դեպքում կառուցվածքը կրում է ջերմային դեֆորմացիա ( $\varepsilon^T(z)$ ), որը տարբեր շերտերի համար նույնը չէ:

$$\varepsilon^T(z) = \alpha(z)\Delta T \tag{2}$$

որտեղ՝  $\Delta T$ -ն ջերմաստիճանի փոփոխությունն է,  $\alpha(z)$ -ը գծային ընդարձակման գործակիցն է:

Կորացած չորսուի հաստությամբ բաշխված դեֆորմացիան ունի հետևյալ տեսքը [2,152]՝

$$\varepsilon_{xx}(z) = \varepsilon_1 + \left(z - \frac{H}{2}\right) \xi \tag{3}$$

որտեղ՝  $\xi$ -ն կորությունն է,  $\varepsilon_1$  համասեռ դեֆորմացիայի արժեքը,  $H$ -ը՝ կառուցվածքի ընդհանուր հաստությունը: Ջերմաստիճանի փոփոխության պատճառով կառուցվածքը կրում է առաձգական դեֆորմացիա՝

$$\varepsilon_{xx}^{wp}(z) = \varepsilon_{xx}(z) - \varepsilon_{xx}^T(z) \tag{4}$$

Չուկի օրենքի համաձայն՝

$$\varepsilon_{xx}^{wp}(z) = \frac{\sigma_{xx}(z)}{E} \tag{5}$$

որտեղ՝  $E$  -ն Յունգի մոդուլն է:

(2)-(5) բանաձևերից ստանում ենք.

$$\frac{\sigma_{xx}(z)}{E} = \varepsilon_1 + \left(z - \frac{H}{2}\right) \xi - \alpha(z)\Delta T \quad (6)$$

Առաձգական լարումների որոշման համար օգտվենք ստատիկ վիճակի պայմաններից, ըստ որոնց՝ դիտարկվող հատույթում գումարային ուժերի և այդ ուժերի մոմենտների գումարը հավասար են զրոյի: Մեր դեպքում այդ պայմանները կունենան հետևյալ տեսքը՝

$$\int_0^H \sigma_{xx}(z) dz = 0 \quad (7ա)$$

$$\int_0^H z \sigma_{xx}(z) dz = 0 \quad (7բ)$$

(6) բանաձևից տեղադրելով լարման  $\sigma_{xx}(z)$  արժեքը (7) համակարգում, կարող ենք համակարգից որոշել կառուցվածքի համասեռ  $\varepsilon_1$  դեֆորմացիան և  $\xi$  կորույթունը և տեղադրելով (6)-ում՝ գտնել լարման կախումը կառուցվածքի  $z$  խորությունից

$$\sigma_{xx}(z) = \frac{E\Delta T}{H} \left[ \frac{6}{H} \left( \frac{2z}{H} - 1 \right) \int_0^H z \alpha(z) dz + 2 \left( 2 - \frac{3z}{H} \right) \int_0^H \alpha(y) dy - \alpha(z)H \right] \quad (8)$$

$Al_xGa_{1-x}As$  համակարգում, որտեղ գծային ընդարձակման գործակցի կախումը ալյումինի  $x$  քանակից առաջին մոտավորությամբ տրվում է  $\alpha_{AlAs}$  և  $\alpha_{GaAs}$  մեծությունների գծային ինտերպոլացիայով [8,2544]՝ հնգաշերտ հետերոկառուցվածքի  $z$  խորության շերտում ներքին լարման համար (8) բանաձևից կստանանք՝

$$\sigma_{xx}(z) = E\Delta T \left[ \Sigma_A + 3 \left( \frac{2z}{H} - 1 \right) \Sigma_B - \beta_3 \right] \quad (9)$$

որտեղ՝

$$\Sigma_A = \frac{1}{H} \left( \frac{\beta_{21} + \beta_{23}}{2} h_2 + \beta_3 h_3 + \beta_4 h_4 + \beta_5 h_5 \right) \quad (9ա)$$

$$\Sigma_B = \frac{1}{H^2} \left[ \frac{\beta_{23} - \beta_{21}}{2} \frac{h_2^2}{3} + \frac{\beta_{21} + \beta_{23}}{2} h_2 (h_1 - h_3 - h_4 - h_5) + \right.$$

$$\left. + \beta_3 h_3 (h_1 + h_2 - h_4 - h_5) + \beta_4 h_4 (h_1 + h_2 + h_3 - h_5) + \beta_5 h_5 (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \right] \quad (9բ)$$

և կատարված են հետևյալ նշանակումները՝

$$\beta_i = \alpha_i - \alpha_1, \beta_{2i} = \alpha_{2i} - \alpha_i \quad (9գ)$$

Այստեղ  $\alpha_i$ -ն  $i$ -րդ հաստատուն բաղադրությամբ շերտի գծային ընդարձակման գործակիցն է:

Հաշվենք ներքին լարումների հետևանքով խորանարդային բյուրեղներում դեֆորմացիայի ազդեցությամբ առաջացող տետրագոնալ շեղումները [7, 63] (նկար 1):

$$\theta(z) = 1 - \frac{a}{c} = 1 - \frac{1 + \varepsilon_{zz}}{1 + \varepsilon_{xx}} \cong \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz} \quad (10)$$

Համաձայն Հուկի օրենքի՝

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E}, \varepsilon_{zz} = -\nu \frac{\sigma_{xx}}{E} \quad (11)$$

որտեղ  $\nu$ -ն Պուասոնի գործակիցն է:

(10)-ի մեջ տեղադրելով (11)-ը՝  $\theta(z)$  տեսրագոնալ շեղման համար կստանանք՝

$$\theta(z) = \frac{\sigma_{xx}(z)}{E} (1 + \nu) \quad (12)$$

Ինչպես նշվել էր, ներքին լարումներն իրենց ազդեցությամբ նման են արտաքին միառանցքանի սեղման դեֆորմացիաներին (տե՛ս նկար 1բ):

Հաշվենք ներքին լարումներին համարժեք արտաքին միառանցքանի ճնշումները: Դրա համար օգտվենք այն փաստից, որ ինչպես ներքին լարումները, այնպես էլ արտաքին միառանցքանի ճնշումները խորանարդային բյուրեղներում առաջացնում են տեսրագոնալ շեղումներ: Առաձգականության տեսությունից հայտնի է [5,27], որ արտաքին միառանցքանի  $P$  ճնշումը խորանարդային բյուրեղում առաջացնում է տեսրագոնալ շեղում, որի մեծությունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով

$$\theta_{արտ} = -P \frac{(1+\nu)}{E} \quad (13)$$

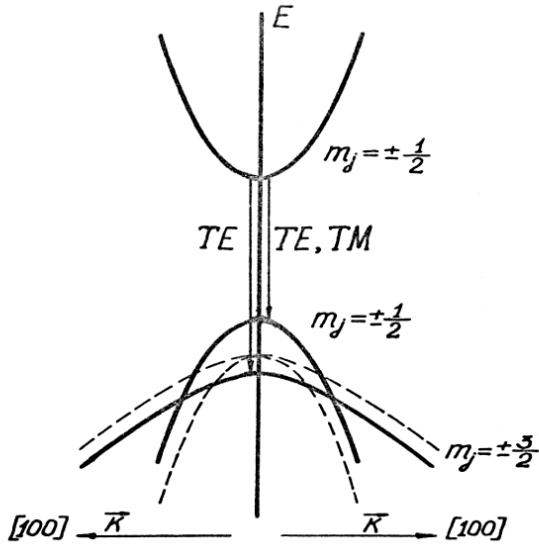
$z$  խորության շերտում առաջացած ներքին թերմոառաձգական լարումներին համարժեք արտաքին միառանցքանի ճնշման մեծությունը հաշվելու համար հավասարեցնենք (12) և (13) արտահայտությունները: Կստանանք՝

$$P = -\sigma_{xx}(z) \quad (14)$$

Արտաքին ճնշումներն ազդում են լիցքակիրների էֆեկտիվ զանգվածների և շարժունակությունների արժեքների վրա, սակայն այդ փոփոխությունները աննշան են

( $\Delta m^*/m^* \sim 10^{-3}$ ) և դիտարկվող ճնշումների դեպքում կարելի է հաշվի չառնել [1, 462]:

GaAs-ում արտաքին միառանցքանի ճնշումներն առաջացնում են նաև հաղորդականության և վալենտական գոտիների էքստրեմումներում էներգիայի արժեքների փոփոխություններ [1, 391; 7, 82], ընդ որում բոլոր էքստրեմումների արժեքները մեծանում են և համաձայն [7, 84]-ի՝ արտաքին միառանցքանի ճնշման մի քանի տասնյակ մթն. արժեքների դեպքում վալենտական գոտու ճեղքումը կազմում է մի քանի մԷՎ, ինչն ապահովում է վալենտական գոտու գագաթում ծանր և թեթև խոռոչների մակարդակների բաժանումը, և վերանում է վալենտական գոտու գագաթում ծանր ու թեթև խոռոչների այլասերումը (նկար 3): Հետևաբար, դեֆորմացիայի ազդեցությունները կարելի է ուսումնասիրել՝ դիտարկելով էլեկտրոն-խոռոչ ռեկոմբինացիայով պայմանավորված լազերային ճառագայթումը:



**Նկար 3. Վալենտական գոտու ձեղքումը [100] ուղղությամբ միատանցքանի ճնշմամբ և էլեկտրոն-խոռոչներ ռեկոմբինացիոն ճառագայթման բնեռագվածությունները:**

Համաձայն էլեկտրոն-խոռոչ ռեկոմբինացիայի ջոկման կանոնների ( $\Delta m_j = 0 \pm 1$ ) թույլատրված են էլեկտրոնի ռեկոմբինացիոն անցումները հարդր-դականության գոտուց ինչպես թեթև, այնպես էլ ծանր խոռոչներով գոտի, ընդ որում  $\Delta m_j = 0$  (թեթև խոռոչներ) անցմանը համապատասխանում է լազերային ճառագայթման TM բնեռացումը, իսկ  $\Delta m_j = \pm 1$  (ծանր և թեթև խոռոչներ) անցումներին՝ TE բնեռացումը (նկար 3): Բոլորիսկանական անցումների հաշվառումից հետևում է, որ էլեկտրոն-թեթև խոռոչ ռեկոմբինացիային համապատասխանում է բնեռացման 60% աստիճանով TM ալիք [4, 67]: Եթե ծանր և թեթև խոռոչների բաշխման մեջ չկա անիզոտրոպիա, ապա անցումների ընդհանուր հավանականությունը, որոնցից ստացվում են TM և TE բնեռացումները, հավասար է և ճառագայթվում է ոչ բնեռացված լույս: Խոռոչների բաշխման մեջ անիզոտրոպիայի առկայության դեպքում առաջանում են բնեռացման էֆեկտներ: Այսպես օրինակ նման անիզոտրոպիայի առաջացումը հնարավոր է արտաքին միատանցքանի ճնշման ազդեցությամբ, ընդ որում արտաքին միատանցքանի ճնշման այն արժեքները, որոնց դեպքում տեղի է ունենում ճառագայթման TE բնեռացումից անցում TM բնեռացման, կազմում են մի քանի տասնյակից մինչև մի քանի հարյուր մթնոլորտ [4, 69]:

Համաձայն (1) պայմանի՝  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  համակարգում, կախված  $x$  և  $y$  արժեքներից,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  շերտի անցման հարթությունում կարելի է ստանալ ինչպես ձգման, այնպես էլ սեղման դեֆորմացիաներ:

Շերտերում դեֆորմացիաների փոփոխությունները փորձնականորեն կարելի է իրականացնել եռաշերտ կառուցվածքներում՝ աստիճանաբար փոքրացնելով մեծ հաստությամբ առաջին շերտի  $h_1$  հաստությունը [3, 115]: GaAs հարթակի վրա աճեցված եռաշերտ  $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  կառուցվածքի բարակ  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  շերտում կզգացվեն ինչպես  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  շերտի սեղմող, այնպես էլ GaAs շերտի ձգող ազդեցությունները: Աստիճանաբար փոփոխելով GaAs շերտի հաստությունը՝ կարելի է փոփոխել  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  շերտում ներքին լարումների մեծությունը: Ներքին միառանցքանի լարումների փոփոխությունը պետք է առաջացնի կիսահաղորդչի վալենտական գոտում այլասերման վերացում և թեթև ու ծանր խոռոչների մակարդակների միմյանցից բաժանում (տե՛ս նկար 3): Այս դեպքում որևիցե օպտիկական մեծության փոփոխության չափման արդյունքում կարելի է գնահատել ներքին թերմոառաձգական լարումների մեծությունները: [3, 115] աշխատանքում եռաշերտ  $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  կառուցվածքի համար (9)-(9գ) և (14) բանաձևերով հաշվարկվել է ներքին լարման (նաև նրան համարժեք արտաքին միառանցք ճնշման) կախվածությունը եռաշերտ կառուցվածքի ընդհանուր  $H$  հաստությունից: Այդ աշխատանքում աստիճանաբար փոքրացվել է GaAs հարթակի հաստությունը և չափվել է  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  շերտում օպտիկական զրգման միջոցով առաջացող լազերային ճառագայթման բևեռացման աստիճանը՝ կախված GaAs շերտի հաստությունից: Փորձնականորեն ցույց է տրվել, որ ներքին լարումների համարժեք արտաքին միառանցք ճնշումների  $\approx (90 \pm 10)$  մթն. արժեքների դեպքում տեղի ունի լազերային ճառագայթման բևեռացման փոփոխություն:

### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. Бир Г. Л., Пикус Г. Е. – Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках, изд. «Наука», Москва, 1972, 584 стр.
2. Боли Б.А., Уэйтер Д.Н.–Теория температурных напряжений, изд. “Мир” Москва, 1964, 563 стр.
3. Кочарян В.Р.-Исследование излучателей света на основе плавных гетероэпитаксиальных структур, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Ленинград, 1981, 142 стр.
4. Кочарян В.Р., Портной Е.Л.-Влияние внутренних давлений на поляризацию излучения инжекционных гетеролазеров, Материалы VIII координационного совещания секции «Полупроводниковые гетеропереходы» научного совета по проблеме физики и химии полупроводников АН СССР, Ереван, 1982, стр. 66-71.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц И.М.– Теория упругости, изд. «Наука», Москва, 1965, 244 стр.
6. Милнс А., Фойхт Д.–Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник, изд. «Мир», Москва, 1981, 432 стр.
7. Полякова А.Л.–Деформация полупроводников и полупроводников приборов, Москва, «Энергия», 1979, 167 стр.
8. Olsen G.H., Ettenberg M.–Calculated stresses in multilayered heteroepitaxial structures, J. Appl. Phys., 1977, vol.48, No.6, 2543-2547.

## Внутренние термоупругие напряжения в полупроводниковых многослойных структурах

*Григорян Гоар  
Кочарян Вилен*

### Резюме

**Ключевые слова:** *упругое напряжение, легирование, гетеропереход, деформация, одноосное давление, электронно-дырочная рекомбинация, лазер, поляризация излучения*

В статье рассмотрено возникновение внутренних механических напряжений, вызванных разностью постоянных решеток в многослойных полупроводниковых структурах. Влияния таких напряжений на слои похожи действиям внешних одноосных давлений. Действие внутренней растягивающей деформации в плоскости перехода слоев идентично влиянию внешнего одноосного сжатия в перпендикулярном направлении, а внешнее одноосное растяжение соответствует внутренней деформации сжатия.

Направления и величины внутренних напряжений в переходных слоях зависят как от постоянных решеток, так и от толщин слоев и, в зависимости от их соотношений, слои могут находиться как в сжатом, так и в растянутом состоянии. Приведен критерий перехода от деформации растяжения к деформации сжатия для двухслойного гетероперехода.

Разработан общий метод расчета внутренних механических напряжений и получены выражения для определения внутренних термоупругих напряжений и соответствующих им внешних одноосных давлений для пятислойной конструкции, реализуемой в полупроводниковых излучателях света. Показано, что расчетные результаты, полученные для гетеролазеров, хорошо согласуются с экспериментальными литературными данными.



# Internal Thermoelastic Stresses in Semiconductor Multilayer Structures

*Grigoryan Gohar  
Kocharyan Vilen*

## Summary

**Keywords:** *elastic stress, doping, heterojunction, deformation, uniaxial pressure, electron-hole recombination, laser, radiation polarization*

The article considers the occurrence of internal mechanical stresses caused by the difference in the constant gratings in multilayer semiconductor structures. The effects of such stresses on the layers are similar to the actions of external uniaxial pressures. The effect of internal tensile deformation in the plane of transition of layers is identical to the effect of external uniaxial compression in the perpendicular direction, and external uniaxial tension corresponds to internal compression deformation.

The directions and magnitudes of the internal stresses in the transition layers depend on both the permanent gratings and the thicknesses of the layers, and depending on their ratios, the layers can be both compressed and stretched. The criterion of the transition from tensile deformation to compression deformation for a two-layer heterojunction is presented.

A general method has been developed for calculating internal mechanical stresses, and expressions have been obtained for determining internal thermoelastic stresses and the corresponding external uniaxial pressures for a five-layer structure, implemented in semiconductor light emitters. It is shown that the calculated results, obtained for heterolasers, fully coincide with experimental literature data.