

# Infrarooi analise van Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-epilages

JAA Engelbrecht,<sup>1</sup> ME Lee,<sup>1</sup> JR Botha,<sup>2</sup> WE Goosen,<sup>1</sup> EG Minnaar,<sup>2</sup> V Wagener<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sentrum vir HRTEM, Nelson Mandela-universiteit, Suid-Afrika

<sup>2</sup> Departement Fisika, Nelson Mandela-universiteit, Suid-Afrika

<sup>3</sup> Incomar Precise Aerospace Solutions, Suid-Afrika

**Korresponderende outeur:** Japie Engelbrecht **E-pos:** [Japie.Engelbrecht@mandela.ac.za](mailto:Japie.Engelbrecht@mandela.ac.za)

Die gebruik van aluminium gallium arsenied (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As) in optiese toestel toepassings vereis dat die brekingsindeks  $n$  van die ternêre legering as 'n funksie van golflengte of golfgetal en die Al-molfraksie  $x$  bekend moet wees. Infrarooi spektroskopie is gebruik om beide die bandgaping  $E_g$  en die interferensiepatrone te bepaal om die epilaagdikte van Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-monsters te bereken. Twee formules wat voorgestel is om die brekingsindeks van Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As te bereken, word aan die hand van die laagdikteresultate geëvalueer.

**Sleutelwoorde (soektogte in Engels):** Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, refractive index, FTIR, layer thickness

**Infrared analysis of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Epilayers:** The use of Aluminium Gallium Arsenide (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As) in optical device applications requires knowledge of the refractive index  $n$  of the ternary alloy as a function of wavelength or wavenumber and Al molar fraction  $x$ . Infrared spectroscopy was used to determine both the band gap  $E_g$  and the interference fringes to calculate the epilayer thickness of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As samples. Two formulas proposed to calculate the refractive index of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As are evaluated from the layer thickness results.

**Keywords:** Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, refractive index, FTIR, layer thickness

## Inleiding

Legerings van aluminium gallium arsenied (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As) word gebruik in hoëspoed-, hoëfrekwensie-mikrogolftoestelle (Adachi, 1992), hoë elektronmobiliteit-transistors (HEMT) (Lenka & Panda, 2009), kwantumput-infrarooi fotodetektors (Billaha & Das, 2017) en ander elektro-optiese toestelle. Die brekingsindeks van die legering van Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As wat benut word, moet bekend wees om die spesifieke toestelle met gegewe optiese eienskappe te kan ontwerp.

Die huidige artikel rapporteer 'n moeitelose manier om die bandgaping ( $E_g$ ) en molfraksie  $x$  van ternêre Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-legerings met 'n verskillende Al-molfraksie te verkry. Resultate word dan gebruik om die dikte van die onderskeie epilages te bereken.

## Teorie

Een van die vroegste besprekings van die brekingsindeks van Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As was 'n semi-empiriese formulering deur Afromowitz (Afromowitz, 1974):

$$(n^2 - 1) = E_d/E_0 + E^2(E_d/E_0)^3 \quad (1)$$

waar  $n$  die brekingsindeks is en parameters  $E_0$  en  $E_d$  gegee word aan die hand van die Al-molfraksie  $x$  as:

$$E_0 = 3,65 + 0,871x + 0,179x^2 \quad (2)$$

$$E_d = 36,1 - 2,45x \quad (3)$$

Terwyl die bandgaping  $E_g$  van Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As gegee word deur:

$$E_g = 1,424 + 1,266x + 0,26x^2 \quad (4)$$

'n Metode gebaseer op die reële en denkbeeldige dele van die diëlektriese funksie  $\epsilon(\omega) = n(\omega) + ik(\omega) = \epsilon_1 + i\epsilon_2$  en wat gebruik maak van die Kramers-Kronig-transformasie is deur Adachi voorgestel om die optiese konstantes te verkry, met inbegrip van die brekingsindeks (Adachi, 1985):

$$n(\lambda) = \sqrt{A_0 \left[ f(x) + \frac{f(x_{s0})}{2} \left( \frac{E_0}{E_0 + \Delta_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right]} + B_0 \quad (5)$$

met

$$f(x) = \frac{2 - \sqrt{1+x} - \sqrt{1-x}}{x^2}$$

$$x = \frac{hc}{\lambda E_0}$$

$$x_{s0} = \frac{hc}{\lambda(E_0 + \Delta_0)}$$

$$A_0 = 6,3 + 19,0x$$

$$B_0 = 9,4 - 10,2x$$

wat gepaste konstantes is aan die hand van die Al-molfraksie  $x$ .

$$E_0(x) = 1,425 + 1,155x + 0,37x^2 \text{ [eV]}$$

wat die fundamentele bandgaping is, terwyl

$$E_0(x) + \Delta_0(x) = 1,765 + 1,115x + 0,37x^2 \text{ [eV]}$$

die spinbaansplittingsenergie is,  $h$  Planck se konstante,  $c$  die spoed van lig,  $\lambda$  die golflengte en  $hc/\lambda$  die fotonenergie is.

Die bandgaping  $E_g$  van Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As kan gereedelik verkry word vanaf die minimum in die infrarooirefleksiespektra (Holtz et al., 2001). Hierdie minimum of infleksiepunt is te wyte aan

die feit dat energie van die invallende infrarooi straling deur die energiegaping tussen die valensie- en geleidingsband van die materiaal geabsorbeer word. Dit lei tot 'n afname in die weerkaatste intensiteit. Die Al-molfraksie  $x$  kan dan van die gemete bandgaping  $E_g$  bereken word deur die toepaslike formule te gebruik (Adachi, 1985):

$$0 < x < 0,45 \quad E_g = 1,424 + 1,247x \quad (6)$$

$$0,45 < x < 1 \quad E_g = 1,9 + 0,125x + 0,143x^2 \quad (7)$$

Infrarooirefleksiespektra kan ook gebruik word om die epilaagdikte  $d$  van 'n monster met 'n parallelle plaatstruktuur te bereken vanaf die volgende (Reizman, 1965):

$$1/d = (2/p)[n_2/\lambda_2 - n_1/\lambda_1] \quad (8)$$

waar  $p$  die getal minima tussen golflengtes  $\lambda_1$  en  $\lambda_2$  en  $n_1$  en  $n_2$  die brekingsindeks by  $\lambda_1$  en  $\lambda_2$  is.

### Eksperimentele Resultate

$Al_xGa_{1-x}As$ -epilagies met verskillende aluminiumkonsentrasies is voorberei met behulp van organometaaldampfase- epitaksiale neerslag (OMDFE-neerslag). 'n Bruker 80V FTIR-spektrometer is gebruik om infrarooirefleksiespektra te meet, met 'n Pike 10Spec-spieëlweerkaatsingstoestel, wat 'n byna loodregte

invalshoek op die monsters moontlik gemaak het. 'n Gemiddelde is verkry vir 50 skanderings wat by 'n resolusie van  $8 \text{ cm}^{-1}$  in die golflengtereeks van 0,5–50 eV verkry is. Die bandgaping  $E_g$  en die Al-molfraksie is dan gemeet en bereken, waarna die laagdikte van die betrokke monster bereken is.

Die resultate van die gemete bandgaping  $E_g$ , die geassosieerde Al-molfraksie  $x$  en die epilaagdiktes bereken uit die vergelykings voorgestel deur Afromowitz [4] en Adachi [5] word in Tabel I aangebied (Afromowitz, 1974; Adachi, 1985). Die bandgaping vir GaAs = 1,43 eV en dié vir AlAs = 2,16 eV. Na gelang meer Al by die legering gevoeg word, sal die bandgaping toeneem volgens Vegard se wet soos die legering al hoe meer soos AlAs word.

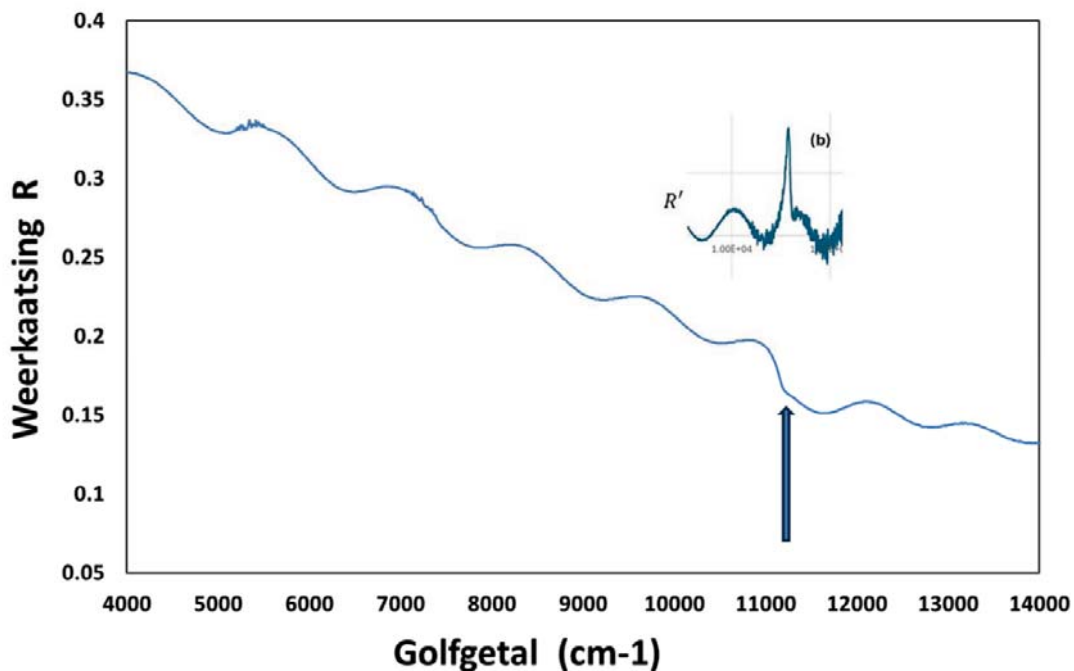
Die laagdiktes wat in Tabel I vir beide die Afromowitz- en Adachi-formulerings aangegee word, is waardes wat óf ooreenstem óf ten opsigte van die 2de desimale plek verskil, met 'n maksimum fout van ~1%. Daar kan dus tot die gevolgtrekking gekom word dat beide formules dieselfde epilaagdikte vir  $Al_xGa_{1-x}As$ -legerings lewer.

### Gevolgtrekkings

Die infrarooi analise van ternêre  $Al_xGa_{1-x}As$ -legerings is 'n vinnige en eenvoudige tegniek wat die bepaling van bandgaping, Al-

**Tabel I:** Bandgapings, molfraksies en epilaagdiktes van geëvalueerde monsters

Monster	Minimum IR-refleksie (cm <sup>-1</sup> )	Bandgaping $E_g$ (eV)	Al-molfraksie $x$	Laagdikte (µm)	
				Afromowitz	Adachi
A	13716,3	1,70	0,22	2,63	2,62
B	14603,8	1,81	0,31	1,06	1,06
C	15330,0	1,90	0,38	1,08	1,07
D	17264,0	2,14	0,93	0,66	0,66



**Figuur 1:** (a) 'n Voorbeeld van 'n infrarooirefleksiespektrum wat interferensiepatrone toon, met die pyl wat die infleksiepunt aandui waar die bandgaping  $E_g$  gemeet word, bevestig deur die eerste afgeleide in (b).

molfraksie en epilaagdiktes vanaf 'n enkele reflektansiespektrum van  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -halfgeleiermonsters moontlik maak.

## Erkennings

Befondsing verskaf deur die Nasionale Navorsingstigting (NNS) word met dank erken. Enige mening, bevindinge en gevolgtrekkings of aanbevelings wat in hierdie artikel uitgespreek word, is dié van die outeurs, en daarom aanvaar die NNS nie aanspreeklikheid ten opsigte daarvan nie. Nuttige gesprekke met en die verskaffing van monsters deur prof MC Wagener en dr JH O'Connell vir hulp met die eerste derivaatverwerking word erken. Die skrywers wil ook hul dank betuig teenoor prof SWP Engelbrecht vir die beskikbaarstelling van sy fasiliteite vir 'n deel van die ondersoek.

## Bibliografie

- Adachi, S., 1985, GaAs, AlAs, and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : Material parameters for use in research and device applications, *Journal of Applied Physics* 85, R1-R29. <https://doi.org/10.1063/1.336070>.
- Adachi, S., 1992, Optical properties, "Physical properties of III-V semiconductor compounds", John Wiley and Sons NY, Chapter 8. <https://doi.org/10.1002/352760281X>.
- Afromowitz, M.A., 1974, Refractive index of  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ , *Solid State Communications* 15, 59-63. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(74\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0038-1098(74)90014-3).
- Billaha, A., Das, M.K., 2017, Influence of doping on the performance of GaAs/AlGaAs QWIP for long wavelength applications, *Opto-Electronic Review* 24, 25-33. <https://doi.org/10.1515/oere-2016-0006>.
- Holtz, M., Prokofyeva, T., Seon, M., et al., 2001, Composition dependence of the optical phonon energies in hexagonal  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , *Journal of Applied Physics* 89, 7977-7982. <https://doi.org/10.1063/1.1372661>.
- Lenka, T.R., Panda, A.K., 2009, Characteristics study of modulation doped GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  based pseudomorphic HEMT, *International Journal of Recent Trends in Engineering* 1, 186-190.
- Reizmann, F., 1965, Optical thickness measurement of thin transparent films on silicon, *Journal of Applied Physics* 36, 3804-3807. <https://doi.org/10.1063/1.1713951>.