

# Verstuiwingsopbrengs van indium vanaf dunlagies gebombardeer met lae energie Ar<sup>+</sup> ioonbundels

**Outeurs:**

MJ Madito<sup>a</sup>  
JJ Terblans<sup>b</sup>  
HC Swart<sup>b</sup>  
CB Mtshali<sup>a</sup>

**Affiliaties:**

<sup>a</sup>Themba LABS, Nasionale Navorsingstigting  
Posbus 722, Somerset Wes, 7129, Kaapstad, Suid-Afrika  
<sup>b</sup>Departement Fisika, Universiteit van die Vrystaat  
Posbus 339, Bloemfontein, 9300, Suid-Afrika

**Korresponderende outeur:**

JJ Terblans  
E-pos: TerblansJJ@ufs.ac.za

**Datums:**

Ontvang: 30/05/19  
Aanvaar: 14/11/19  
Gepubliseer: 04/05/20

**Hoe om hierdie artikel aan te haal:**

MJ Madito, JJ Terblans, HC Swart, CB Mtshali, Verstuiwingsopbrengs van indium vanaf dunlagies gebombardeer met lae energie Ar<sup>+</sup> ioonbundels, *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Natuurwetenskap en Tegnologie* 39(1) (2020). <https://doi.org/10.36303/SATNT.2020.39.1.751>

An English copy of this paper is available online at <http://www.satnt.ac.za/index.php/satnt/article/view/751>

**Kopiereg:**

© 2020. Authors.  
Licensee: *Die Suid-Afrikaanse Akademie vir Wetenskap en Kuns*.  
Hierdie werk is onder die Creative Commons Attribution License gelisensieer.

Edelgasioonverstuiwing gekombineer met Auger elektronspektroskopie (AES) word algemeen gebruik vir die bepaling van die elementsamestelling van die diepteprofiel van die teikenmateriaal. Sulke diepteprofieelsamestellings is algemeen gebruik vir element samestellingsanalise asook vir bepaling van die verstuiwingsopbrengs van die teikenmateriaal. Ondanks 'n groot aantal publikasies oor verstuiwingsopbrengs, is daar slegs 'n klein aantal verslae in die literatuur oor die gemete verstuiwingsopbrengs van Indiumverbindinge. In word gebruik vir die dotering van halfgeleiers in elektroniese toestelle (transistors) en dunlagies sonselle. Dit is noodsaaklik om betroubare verstuiwingsopbrengs vir die In metaal te hê, vir akkurate diepte inligting (vir In dunlagies) met Ar<sup>+</sup> ioonprofielering. In hierdie studie word die Ar<sup>+</sup> ioonverstuiwingsopbrengs vanaf In dunlagies gerapporteer vir 'n reeks lae ioonbundel energieë (0.5 – 4.0 keV). Die In dunlagies (106 nm) is op 'n SiO<sub>2</sub> substraat opgedamp in vakuum deur van elektronbundelopdamping gebruik te maak. Die dunlagies is met Ar<sup>+</sup> ioonverstuiwing gekombineer met AES analise om die diepteprofieelsamestelling te verkry, wat weer gebruik is om die verstuiwingsopbrengs te onttrek. Die verstuiwingsopbrengswaardes is in die orde van 2 tot 6 atome per Ar<sup>+</sup> ioon vir 'n Ar<sup>+</sup> ioonbundel met 'n energie tussen 0.5 – 4.0 keV onderskeidelik. Die Monte Carlo simulasië kode, "Stopping and Range of Ions in Materials" (SRIM) is gebruik om die Ar<sup>+</sup> ioonverstuiwing van die In dunlagie te simuleer en die verstuiwingsopbrengs te verkry. 'n Semi-empiriese formule wat ontwikkel is vir die voorspellings van verstuiwingsopbrengs is ook gebruik om die verstuiwingsopbrengs te bereken. Die verstuiwingsopbrengs verkry vanaf SRIM en die semi-empiriese formule vergelyk goed met die eksperimentele waardes.

**Sleutelwoorde:** In; Verstuiwingsopbrengs; Diepteprofieelsamestelling; Argonioon; Oppervlaktestuiwing; SRIM

**Sputtering yield of indium films bombarded with low energy Ar<sup>+</sup> ion beams:** Noble gas ion sputtering combined with Auger electron spectroscopy (AES) analysis has been applied extensively for elemental composition depth profiling of the target materials. Such depth profiles have been used widely not only for elemental composition analysis but also for extracting the sputtering yields of the target materials. Despite a large number of publications on sputtering yields there are only a small number of reports (in literature) on the measured sputtering yields of indium compounds. Indium is used to dope semiconductors for electronic devices (transistor) and thin film solar cells. In order to obtain accurate depth information (for indium thin films) with Ar<sup>+</sup> ion profiling, it is essential to have reliable sputtering yields for the In metal. In this study, the argon ion sputtering yields of indium films are reported for a range of low ion beam energies (0.5–4.0 keV). The indium films (106 nm) were deposited on SiO<sub>2</sub> substrates under vacuum by electron beam evaporation. The films were subjected to Ar<sup>+</sup> ion sputtering combined with AES analysis to obtain the depth profiles, which were used to extract the sputtering yield values. The obtained sputtering yield values are in the range of 2 to 6 atoms/ions for Ar<sup>+</sup> ion beam energies in the range of 0.5–4.0 keV, respectively. The Monte Carlo simulation code, Stopping and Range of Ions in Materials (SRIM) were used to simulate the Ar<sup>+</sup> ion bombardment of the indium film and to obtain the surface sputtering yields and influences the structures as deposited and the corresponding activities induced. These were also calculated using a semi-empirical formula developed for such predictions. The sputtering yields obtained from SRIM and the semi-empirical formula are in agreement with the experimental values.

**Keywords:** indium; sputtering yield; depth profiles; argon ions; surface sputtering; SRIM

## Inleiding

ioonbundels word algemeen gebruik in ionbundelanalise (IBA) om skadevorming en die evolusie van skade te ondersoek wat hoë energie deeltjies in materiale veroorsaak. Dit is gedoen in 'n poging om die gevolge van blootstelling aan hoë energie ionbombardering te bestudeer (bv. Sien meeste artikels van Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms). Enersyds, die kombinasie van oppervlakspektroskopie tegnieke [bv. Auger elektron-spektroskopie (AES) en X-straal fotoëlektron spektroskopie (XPS)] en andersyds iongasverstuwing (met lae ionbundel energie) is handige diepteprofielanalise tegnieke waarmee elementsamestelling met diepte bekom word. (Zalar en Hofmann, 1993, Seah, 1984) Ioonverstuwing het ook 'n belangrike vervaardigingstegniek in die halfgeleierindustrie geword.

Verstuwing word hoofsaaklik gekarakteriseer deur die verstuwingsoptreks,  $Y$ , wat gedefinieer is as Eq. 1 (Nastasi *et al.*, 1996)

$$Y = \frac{\text{Gemiddelde aantal vrygestelde atome}}{\text{Aantal inval-atome}} \quad (1)$$

Eksperimenteel word die  $Y$  waardes afgelei vanaf die verstuwingstempo ( $\dot{z}$ ) (Watts and Wolstenholme, 2003, Riviere, *et al.*, 2009):

$$\dot{z} = \frac{YI}{e} \quad (2)$$

waar  $I$  die ionbundelstroom is en  $e$  die lading op die ion. Om te bepaal hoeveel atoomlae per sekonde onder die bundel met 'n skandeerarea  $A$  en teikenmateriaal met 'n atoomgewig ( $w$ ) en 'n digtheid ( $\rho$ ) verwyder word, kan vergelyking 2 herskryf word as (Watts and Wolstenholme, 2003, Riviere, *et al.*, 2009):

$$\dot{z} = \frac{YIw}{eNA\rho} \quad (3)$$

waar  $N$  die Avogadro-getal is.

Boonop is die verstuwingsoptreks tipies afhanklik van die ionspesie, energie, invalshoek van die ionbundel en die teikenmateriaal (struktuur en samestelling) (Nastasi *et al.*, 1996). Tipiese waardes vir  $Y$  lê in die omvang van 0.5-10 atome/ion vir 'n gemiddelde massa ionspesie en keV ionbundel energieë van algemene belang in ionvastestof interaksies (Matsunami, *et al.*, 1984, Matsunami, *et al.*, 1981, Nastasi *et al.*, 1996).

Uit die oogpunt van 'n botsingskaskade, sluit die verstuwingsoptreks 'n reeks botsings in waar die energie-oordrag tussen atome in die teiken materiaal is, met die belangrikste energie oordrag (vir verstuwing) tussen die oppervlakatome is. Dus moet elke naby oppervlakte-interaksie of -atoombotsing in diepste besonderhede geëvalueer word en dit kan gedoen word deur van die

binêre botsings Mont Carlo simulasië kode (SRIM) gebruik te maak met die opsie "Oppervlak verstuwing/Monolaag Botsings". 'n Verstuwingstempo (teiken dikte) van  $\sim 3$  nm vir swaar ione ( $Z > 5$ ), is voldoende vir hierdie opsie. In oppervlakspektroskopietegnieke is hierdie diepte vergelyk met die onelastiese gemiddelde vry padlengte van die Auger elektrone (of fotoëlektrone), wat binne 'n paar nm vergelyk met die boonste oppervlak atoomlae van die geanaliseerde monster (Watts and Wolstenholme, 2003, Riviere, *et al.*, 2009). Dit is opmerklik dat hoewel SRIM verkies word, is dit nie 'n dinamiese kode nie. Daarom word in oppervlakverstuwing elke atoomlaag as nuut geag sonder om die effek van die vorige verstuwing in ag te neem. Dit kan die verstuwingsoptreks effens verander (veral onder hoë ionbundel energieë). Nietemin verskaf SRIM berekeninge vir die trajek van ione akkurate besonderhede vir afstand, terugslagmenging en oordragparameters. Dit (SRIM) is al op groot skaal gebruik weens die relatiewe kragtigheid en gemak van gebruik (Ziegler and Biersack, 1985, Ziegler *et al.*, 2010). Teoreties is 'n semi-empiriese formule vir die verstuwing van enkel element teikens ontwikkel deur Matsunami *et al.* (Matsunami, *et al.*, 1984) en Yamamura *et al.* (Yamamura, *et al.*, 1982) deur gebruik te maak van 'n kombinasie van Lindhard se teorie van kern en elektroniese stuiting, tesame met verstuwingsoptreksdata. Ten spyte van die aantal publikasies oor ionbundelverstuwing is baie min oor die verstuwingsoptreks van In in die literatuur beskryf. Hierin doen ons verslag oor die AES  $Ar^+$ -ioonverstuwingsoptreks vanaf 'n In dunlagie gedeponeer op 'n  $SiO_2$  substraat deur elektronbundel opdamming. Die verkrygte eksperimentele verstuwingsoptrekswaardes word vergelyk met SRIM en semi-empiriese formule verstuwingsoptreks.

## Eksperimenteel

Die  $SiO_2$  substraat wat vir hierdie studie gebruik is, is voorberei met behulp van nat-oksidasie van Si(100) teen  $1000^\circ C$  vir 1 uur in 'n Lindberg buismond. Dit is in dunlagies (106 nm) opgedamp op  $SiO_2$  substraat met behulp van elektronbundel opdamming. Voor In opdamming, is suiwer Ti opgedamp om die oorblywende suurstof in die kamer te verwyder om sodoende In oksidasie te verhoed. Gedurende die opdamming was die basis druk in die vakuumkanter  $2.5 \times 10^{-5}$  Torr. Die dikte van die lagie is gemonitor tydens opdamming met 'n gekalibreerde Inficon Leybold Heraeus XTC dunlagie monitor.

Die In dunlagies was onderwerp aan die  $Ar^+$  ionverstuwing gekombineer met Auger elektron-spektroskopie (AES) analise om die dieptesamestellingprofiel te verkry. Auger piek-tot-piekhoogtes (APPHs) is gemonitor as 'n funksie van die verstuwingstyd vir In (301-440 eV), O (450-530 eV), Si (60-105 eV) en C (230-300 eV). Die APPH is omgeskakel na fraksionele konsentrasie met behulp van Palmberg se vergelyking en die korreksie faktore soos bespreek deur Seah and Gilmore (Seah and Gilmore 1998).

Die korreksie faktore sluit in die terugverstrooiingsfaktor, onelastiese gemiddelde vrypadlengte (IMFP) vir Auger elektrone (bereken met die TPP-2M formule (Tanuma *et al.* 2005)), die atoomdigtheid en die elastiese verstrooiingsfaktor. Die sensitiwiteitsfaktore wat gebruik is, is bepaal vanaf suiwer element standarde onder dieselfde toestande wat gebruik is vir die diepteprofielmetings. Die Auger metings is uitgevoer in 'n PHI 600 aftas (skandeer) Auger sisteem met 'n silindriese spieël analiseerder (SSA) en 'n koaksiale iongeweer. Gedurende die analise was die basis druk in die hoofkamer  $9.0 \times 10^{-8}$  Torr en die iongeweer is bedryf teen 'n argon druk van  $3.4 \times 10^{-5}$  Torr in die ionisasiekamer. Die iongeweer se bundelspanning was tussen 0.5 – 4.0 keV en die bundel skandeerarea was  $2 \times 2 \text{ mm}^2$ . 'n Primêre elektronbundel van 10 keV met 'n deursnee van  $\sim 10 \mu\text{m}$  en 'n bundelstroom van 4.8  $\mu\text{A}$  is gebruik vir die AES metings. Die monster is gekantel met 'n hoek van  $30^\circ$  ten opsigte van die normaal (op die film se oppervlak) en die elektronebundel en  $50^\circ$  met betrekking tot die ioonbundel. 'n Faraday-beker met 'n opening (deursnee = 300  $\mu\text{m}$ ) is gebruik om die ioonbundelstroomdigtheid te verkry, en die stroom is met 'n Keithley picoammeter (model 6485) gemeet. Die ioonbundelstabiliteit is gemonitor deur die ioonbundelstroom te meet voor en dadelik na die diepteprofielmetings.

## Resultate en bespreking

Figuur 1(a) tot 1(e) toon die AES diepteprofiel verkry vanaf 'n In dunlagie (106 nm) verstuiw met  $\text{Ar}^+$ -ioonbundels met bundelenergieë in die gebied 0.5 – 4.0 keV. Die element samestellingsprofiel toon dat die In laag gevolg word deur 'n  $\text{SiO}_2$  substraat. Die hoë film suiwerheid (i.e. binne die opsporingslimiet van die AES) is bevestig met die Auger spektrum vanaf die verstuiwde-oppervlak (skoongemaak) van die In film (Figuur 1(f)). Bykomend toon die spektrum prominente pieke by 405 eV en 412 eV wat ooreenstem met die MNN Auger oorgang van In. Die C en O pieke van die Auger spektrum van die soos ontvangde monster is as gevolg van geabsorbeerde spesies tydens die hantering van die monster in atmosfeer. Uit die diepteprofiel kan gesien word dat verstuiwingtyd, om deur die dunlagie te ets, verkort met 'n verhoging van die ioonbundelenergie. Dit beteken dat die verstuiwingstempo ( $\dot{z}$ ) toeneem met die ioonbundelenergie, soos aangedui in Figuur 2(a). Vervolgens is die verstuiwingsopbrengs verkry deur gebruik te maak van vergelyking 3 (sien figuur 2(b)) en die  $\dot{z}$  waardes. Die fout in hierdie waardes kan hoofsaaklik toegeskryf word aan die metings/stabiliteit van die ioonbundelstroomdigtheid.

SRIM is gebruik vir die simulering van die  $\text{Ar}^+$  ioon verstuiwing van die In dunlagies vir die lae ioonbundel energieë (0.5 – 4.0 keV) en vir 'n ioonbundel wat loodreg op die film inval. Die simulasie is uitgevoer met die SRIM-2013 weergawe met die "Oppervlak Verstuiwing/monolaag botsings" opsie. Die sagteware se standaardwaardes van drumpelverplasing en roosterbindingsenergieë is

gebruik en 10 000 invallende-ione is gesimuleer vir statistiese verbetering. Figuur 3(a) toon dat daar 'n toename in die ioon geprojekteerde reikwydte ( $R_p$ ) asook die totale verplasing van 'n teiken atoom is met 'n verhoging van die ioonbundelenergie, wat wys op 'n lineêre kaskade stelsel wat van toepassing is op 'n gemiddelde massa verstuiwingsioon soos  $\text{Ar}^+$ . Vir 'n liniêre kaskade stelsel is die aantal terugslae eweredig aan die energieoordrag per diepte eenheid (Nastasi *et al.*, 1996). Met SRIM word die invalsiene asook die terugslagatoom in die teikenmateriaal gevolg soos hul verdrag tot hul energie laer is as die afsnyenergie van 5.0 eV vir invalsiene en 2.49 eV (oppervlakbindingsenergie) vir In terugslagatome in hierdie geval. In Figuur 3(a), is die verstuiwingsdiepte binne 3 nm en dit stem ooreen met die dikte van die heel boonste atomiese-oppervlakke van die teiken. Verder, soos die  $\text{Ar}^+$  ione tot stilstand kom in die In film, verloor hulle energie deur elektroniese- en kernbotsingsprosesse (Figuur 3(b)). Laasgenoemde proses is verantwoordelik vir die terugslagatome en sommige van hierdie terugslagatome het genoeg energie om te ontsnap uit die vastestof en gee aanleiding tot die verstuiwingsopbrengs (Figuur 3(c)). Die eksperimentele verstuiwingsopbrengswaardes is in ooreenstemming met die waardes van SRIM, wat bevestig dat die opbrengs deel uitmaak van die kern energie-verliesmeganisme (liniêre kaskade stelsel), soos verwag van die  $\text{Ar}^+$  ione.

Die verstuiwingsopbrengs van die In dunlagie is ook bereken aan die hand van die semi empiriese formule ontwikkel deur Matsunami *et al.* (Matsunami, *et al.*, 1984, Matsunami, *et al.*, 1981) en Yamamura *et al.* (Yamamura, *et al.*, 1982), weergegee deur vergelyking 4.

$$Y_E(E) = 0.42 \frac{\alpha_s Q_s S_n(E)}{U_0 [1 + 0.35 U_0 S_c(\epsilon)]} [1 - (E_{th}/E)^{0.5}]^{2.8} \quad (4)$$

Dit geld vir ione met 'n energie  $E$  en 'n loodreg invalshoek, waar  $\alpha_s$  en  $Q_s$  empiriese parameters is wat verkry is vanaf eksperimentele verstuiwingsdata,  $E_{th}$  is die verstuiwingsdrumpel energie,  $S_c(\epsilon)$  is die gereduseerde Lindhard elektroniese stuitingsdeursnee,  $S_n(E)$  is die kern stuitingsdeursnee,  $U_0$  is die oppervlakbindingsenergie. Die verstuiwingsdrumpel energie ( $E_{th}$ ) is bereken met vergelykings 5 tot 11 hieronder (Nastasi *et al.*, 1996, Matsunami, *et al.*, 1984, Matsunami, *et al.*, 1981, Yamamura, *et al.*, 1982):

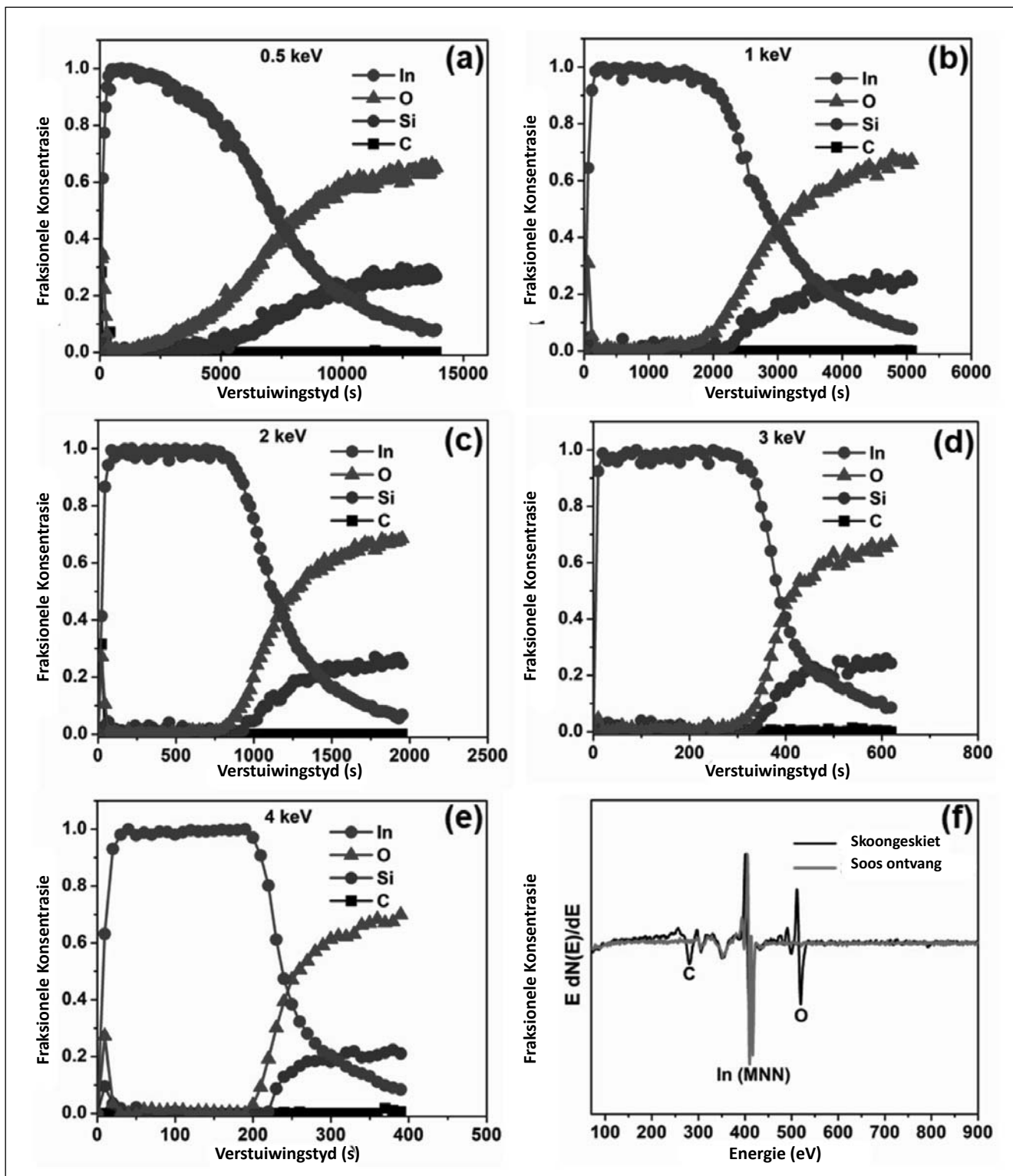
$$E_{th} = \left( \frac{2M_1 + 2M_2}{M_1 + 2M_2} \right)^6 \frac{U_0}{\gamma}, \quad \text{vir } M_1 < M_2 \quad (5)$$

Waar  $M_1$  en  $M_2$  onderskeidelik die massa van die invalsiene en die teikenatoom is,  $\gamma$  is die energieoordrag faktor vir elastiese botsings gegee deur

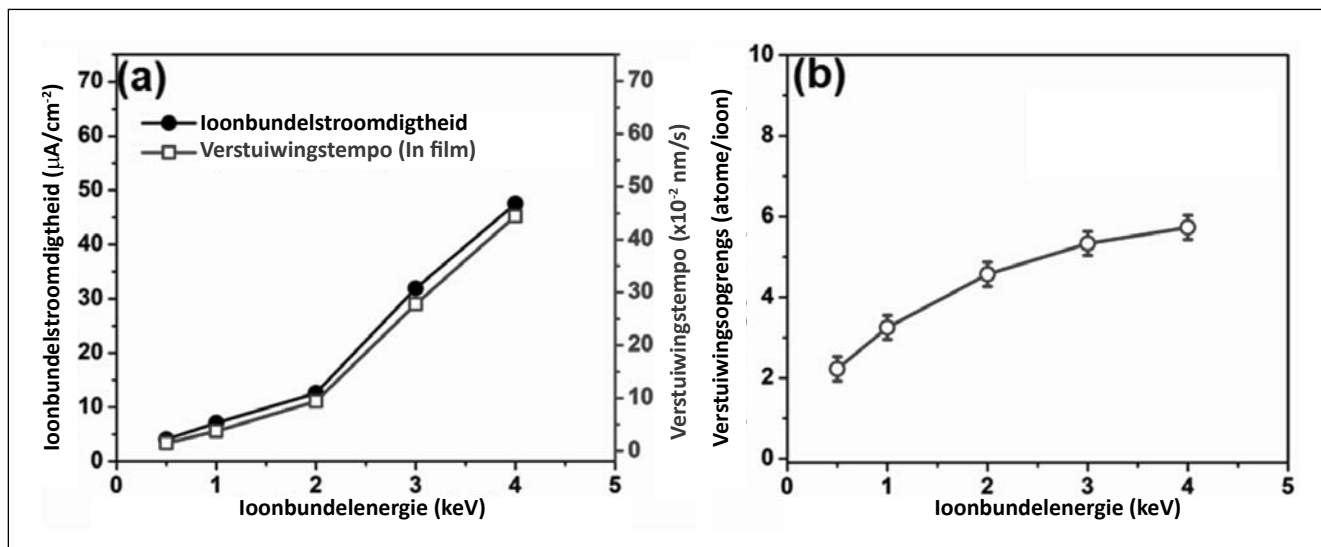
$$\gamma = \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \quad (6)$$

Die kernstuitingsdeursnee word gegee deur

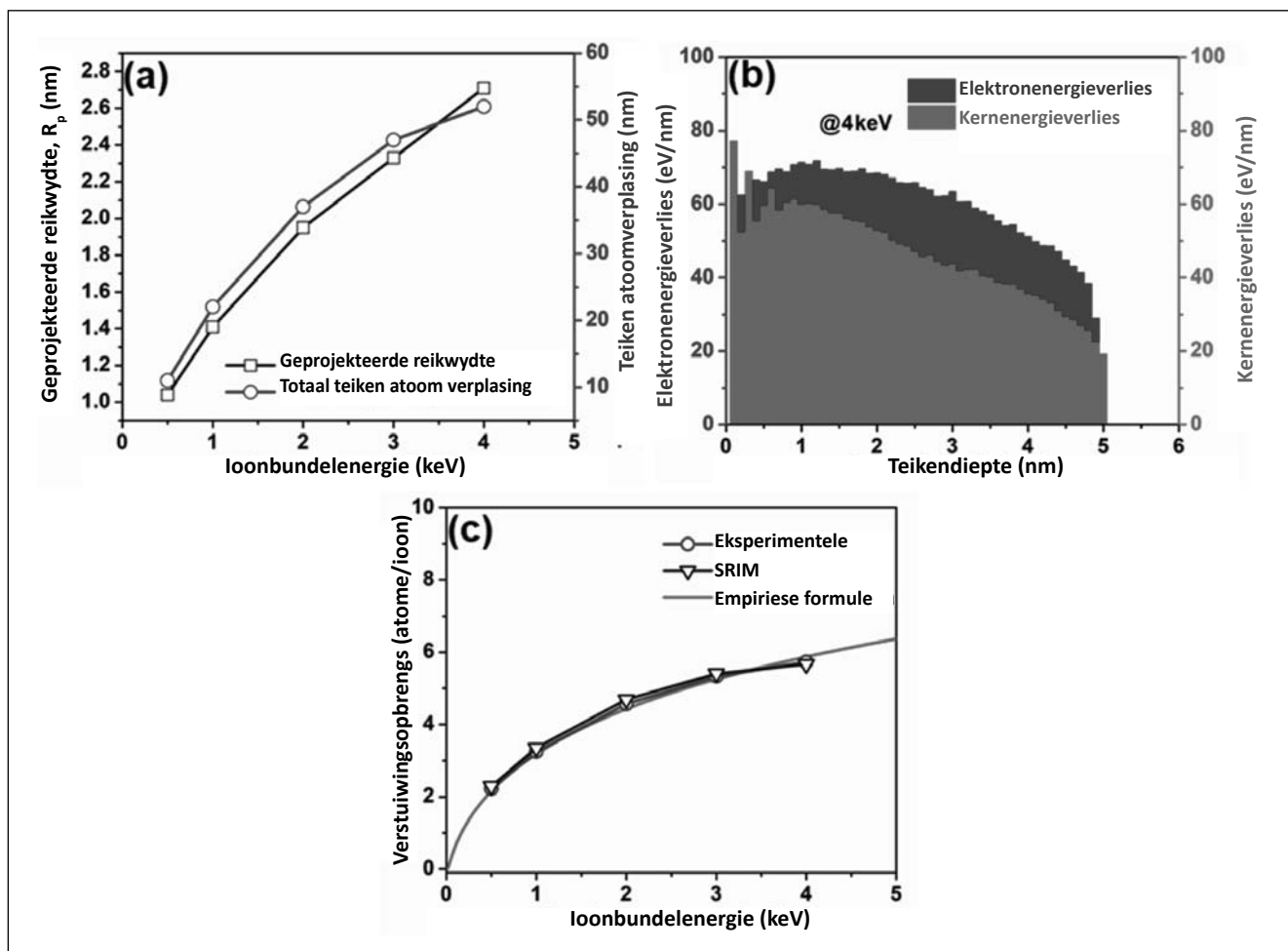
$$S_n(E) = K_n S_n(\epsilon) \quad (7)$$



FIGUUR 1: (a)-(e) AES diepteprofile verkry vanaf die 106 nm dik In dunlagie verstuiw met verskillende Ar<sup>+</sup> ionbundel energieë (0.5 – 4.0 keV). (f) Auger spektra van die soos ontvangde monster en die verstuiwingskoongemaakte oppervlak van die In dunlagie.



FIGUUR 2: (a) Ioonbundelstroomdigtheid en die verstuiwingstempo van die In dunlagie as 'n funksie van ionbundelenergie en (b) die ooreenstemmende verstuiwingsopbrengs.



FIGUUR 3: (a) Toon die ion geprojekteerde reikwydte ( $R_p$ ) en die totale verplasing van 'n teiken atoom as 'n funksie van ionbundelenergie. (b) die elektron- en kern-energieverlies met diepte vir 4 keV  $\text{Ar}^+$  ionbundel. (c) Vergelyking van SRIM, eksperimentele en semi empiriese formule verstuiwingsopbrengs as die funksie van ionbundelenergie.

waar

$$K_n = \frac{8.478Z_1Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_1}{(M_1 + M_2)} \quad (8)$$

en

$$S_n(\varepsilon) = \frac{3.441\varepsilon^{1/2} \ln(\varepsilon + 2.718)}{1 + 6.355\varepsilon^{1/2} + \varepsilon(6.882\varepsilon^{1/2} - 1.708)} \quad (9)$$

In vergelyking 8, is  $Z_1$  en  $Z_2$  onderskeidelik die atoomgetalle van die invalsiion en die teikenmateriaal, en die energie ( $\varepsilon$ ) (in eV), in vergelyking 9 word gegee deur

$$\varepsilon = \frac{0.03255}{Z_1Z_2(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_1}{(M_1 + M_2)} E \quad (10)$$

Alhoewel  $\alpha_s$  en  $Q_s$  bepaal is deur eksperimentele verstuiwingsdata met vergelyking 4 te pas, word die empiriese uitdrukking vir  $\alpha_s$  gegee deur

$$\alpha_s = 0.10 + 0.155(M_2/M_1)^{0.73} + 0.001(M_2/M_1)^{1.5} \quad (11)$$

Die parameterwaardes (vergelyking 5 tot 11) gebruik in vergelyking 4 om die verstuiwingsopbrengs van die In te verkry, is gelys in Tabel 1. Die verstuiwingsopbrengs van

In is bereken aan die hand van die semi-empiriese formule (vergelyking 4) en die parameters is ook gelys in Tabel 1. Die resultate word in Tabel 2 en Figuur 3(c) getoon. Dit is duidelik dat die gemete verstuiwingsopbrengs in goeie ooreenstemming is met die verstuiwingsopbrengs wat met die semi-empiriese formule bereken is en SRIM berekenings. (Hierdie resultate is opgesom in Tabel 2.)

**TABEL 1:** Die parameters wat gebruik is om die verstuiwingsopbrengs van In te bereken.

Parameter	Waarde
$E$ (eV)	0 – 10000
$M_1/M_2$	39.96/114.82
$Z_1/Z_2$	18/49
$\gamma$	0.766
$Q_s$	1.06
$U_0$ (eV)	2.49
$E_{th}$ (eV)	7.45
$\alpha_s$	0.440
$\varepsilon$ (eV)	0 - 0.021 for $E = 0 - 10000$ eV
$K_n$ ( $10^{-15}$ eV cm <sup>2</sup> )	428.9
$S_n$ (e)	0 - 0.264 for $E = 0 - 10000$ eV
$S_e$ (e)	0 - 0.041 for $E = 0 - 10000$ eV

**TABEL 2:** Die Eksperimentele data (ioonbundelenergie en stroomdigtheid en die ooreenstemmende verstuiwingstempo en opbrengswarede), SRIM en semi-empiriese formule verstuiwingsopbrengs vir In.

Ioombundel-energie (keV)	Ioombundel-stroomdigtheid ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Verstuiwingstempo ( $\times 10^{-2}$ nm/s)	Eksperimentele opbrengs (Y) (atoms/ions) $\pm 0.3$	SRIM Opbrengs (Y) (atoms/ions)	Semi-empiriese formule Opbrengs (Y) (atoms/ions)
0.5	4.1	1.49	2.2	2.29	2.16
1.0	7.1	3.77	3.2	3.35	3.18
2.0	12.6	9.40	4.6	4.69	4.43
3.0	31.9	27.78	5.3	5.41	5.25
4.0	47.5	44.44	5.7	5.67	5.87

## Gevolgtrekking

In hierdie studie is die In dunlagies gedeponeer op 'n SiO<sub>2</sub> substraat binne 'n vakuum deur elektronbundel opdamming en daarna onderwerp aan Ar<sup>+</sup> ioonverstuiwing (met ioonbundelenergieë in die gebied van 0.5–4.0 keV) gekombineer met AES analise om die diepteprofielesamestellings te verkry. Dit was weer gebruik om die verstuiwingsopbrengswarede te verkry. Die verstuiwingsopbrengs van In is ook bereken met behulp van SRIM en die empiriese formule ontwikkel deur Matsunami *et al.* (Matsunami, *et al.*, 1984, Matsunami, *et al.*, 1981) en Yamamura *et al.* (Yamamura, *et al.*, 1982). Dit is gevind dat verstuiwingsopbrengs verkry vanaf SRIM en die semi-empiriese berekenings in goeie ooreenstemming is met die eksperimentele waardes.

## Erkenning

Hierdie werk is gebaseer op die navorsing wat deur die Nasionale Navorsingsfonds van Suid-Afrika befonds word deur iThemba LABS Materials Research Department (MRD) en die Kluster program van die Universiteit van die Vrystaat.

## Verwysings

- Matsunami N, Yamamura Y, Itikawa Y, Itoh N, Kazumata Y, Miyagawa S, Morita K, Shimizu R. 1981. A semiempirical formula for the energy dependence of the sputtering yield, *Radiation Effects*, 57, 15–21.
- Matsunami N, Yamamura Y, Itikawa Y, Itoh N, Kazumata Y, Miyagawa S, Morita K, Shimizu R, Tawara H. 1984. Energy dependence of the ion-induced sputtering yields of monatomic solids, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 31, 1–80.
- Nastasi M, Mayer JW, Hirvonen JK. 1996. *Cambridge Solid State Science Series: Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Riviere JC, Myhra S, Myhra S. 2009. *Handbook of Surface and Interface Analysis*, CRC Press.
- Seah MP. 1984. A review of the analysis of surfaces and thin films by AES and XPS, *Vacuum*, 34, 463–478.
- Seah MP, Gilmore IS. 1998. Quantitative AES. VIII: analysis of auger electron intensities from elemental data in a digital auger database, *Surface and Interface Analysis*, 26, 908–929.
- Tanuma S, Powell CJ, Penn DR. 2005. Calculations of electron inelastic mean free paths, *Surface and Interface Analysis*, 37, 1–14.
- Watts JF, Wolstenholme J. 2003. *An introduction to surface analysis by XPS and AES*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Yamamura Y, Matsunami N, Itoh N. 1982. A new empirical formula for the sputtering yield, *Radiation Effects*, 68, 83–87.
- Zalar A, Hofmann S. 1993. Comparison of rotational depth profiling with AES and XPS, *Applied Surface Science*, 68, 361–367.
- Ziegler JF, Biersack JP. 1985. *Treatise on Heavy-Ion Science: The Stopping and Range of Ions in Matter*, Springer US, Boston, MA, pp. 93–129.
- Ziegler JF, Ziegler MD, Biersack, J.P. 2010. SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268, 1818–1823.