

Mekanisme Hamburan Defek Statis Dan Vibrasi Termal Terhadap Mobilitas Elektron Pada Film Tipis GaN

Dadi Rusdiana, Lilik Hasanah, dan Endi Suhendi

Jurusan Pendidikan Fisika, FPMIPA UPI Bandung

Email: dadirusdiana@upi.edu

Abstract

Electrons Mobility in GaN thin films has been determined for temperature variation using approach method to the relaxation time due to the influence of static defect scattering and thermal vibrations. The simulation results show that electron mobility is strongly influenced by environmental temperature, except for the scattering of neutral impurities type that does not affect the value of the charge carrier mobility even though the external temperature was varied.

Keywords: *Electrons Mobility, defect static, thermal vibration*

Abstrak

Mobilitas elektron pada film tipis GaN telah ditentukan untuk variasi temperatur dengan menggunakan metoda pendekatan waktu relaksasi akibat pengaruh hamburan defek statis dan vibrasi termal. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa mobilitas elektron sangat dipengaruhi oleh temperature lingkungan, kecuali untuk hamburan tipe impuritas netral yang tidak mempengaruhi nilai mobilitas muatan pembawa meskipun temperatur eksternal divariasikan.

Kata-Kata Kunci: *Mobilitas elektron, Defek statis, vibrasi termal*

PENDAHULUAN

Bahan semikonduktor paduan GaN pada akhir-akhir ini banyak mendapat perhatian para peneliti, karena bahan tersebut memiliki karakteristik yang unik yaitu memiliki energi gap yang lebar (3,4 eV) dan juga memiliki struktur celah pita energi dengan transisi langsung (*direct bandgap*) sehingga semikonduktor tersebut cocok untuk bahan baku pembuatan divais optoelektronik yang beroperasi pada daerah panjang gelombang pendek seperti detektor ultraviolet yang dapat diaplikasikan untuk sistem informasi dan komunikasi.

Seiring dengan penggunaan-nya yang terus meningkat, maka penyelidikan dan pengungkapan sifat-sifat fisis bahan paduan ini menjadi hal yang sangat penting dalam rangka pengembangan bahan ini selanjutnya. Salah satu sifat fisis penting dari bahan semikonduktor yang menentukan karakteristik listrik dari divais elektronik maupun divais optoelektronik yang terbuat dari bahan ini adalah sifat transport listriknya, yaitu salah satunya adalah nilai mobilitas (μ) pembawa muatan. Karakteristik transport listrik pada bahan dipengaruhi secara langsung oleh mekanisme perturbasi (gangguan) terhadap pergerakan pembawa muatan dalam bahan. Perturbasi (gangguan) biasanya terjadi akibat adanya berbagai jenis mekanisme hamburan (*scattering*). Mekanisme hamburan

pada bahan sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti temperatur lingkungan. Oleh karena itu dengan mengetahui mekanisme perilaku hamburan di bawah pengaruh luar, maka kebergantungan nilai mobilitas pembawa muatan pada bahan semikonduktor paduan GaN terhadap kondisi eksternal seperti temperatur lingkungan dapat dirumuskan. Dalam artikel ini akan dikaji secara teori untuk merumuskan hubungan fungsional antara mobilitas elektron dengan temperatur lingkungan dari pengaruh tipe hamburan defek statis dan vibrasi termal dan akan dilakukan simulasi untuk memperoleh gambaran visual dari bentuk hubungan fungsional tersebut.

Mekanisme transport listrik dalam bahan padat seperti semikonduktor GaN, tidak akan terlepas dari faktor gangguan yang secara langsung dapat mempengaruhinya. Mobilitas listrik pembawa muatan pada penggunaan medan listrik rendah secara langsung berhubungan dengan sifat-sifat mikroskopik bahan, melalui suatu besaran yang dikenal sebagai waktu relaksasi (τ), yang merupakan suatu fungsi dimana fungsi distribusi elektron berelaksasi kembali ke keadaan mantap setelah mengalami hamburan oleh suatu potensial penghambur. Suatu pembawa muatan dapat dihamburkan oleh suatu potensial penghambur yang dapat merubah periodisitas sempurna dari kristal ideal, termasuk diantaranya oleh vibrasi kisi impuritas

(ketakmurnian). Mekanisme hamburan ini akan berbeda antara satu material dengan yang lainnya dan biasanya merupakan fungsi temperatur.

1. Mekanisme Hamburan Impuritas Terionisasi

Banyaknya hamburan yang disebabkan oleh adanya gaya elektrostatis antara pembawa dan impuritas yang terionisasi bergantung pada waktu interaksi dan banyaknya impuritas. Konsentrasi impuritas yang besar akan menghasilkan mobilitas yang rendah (Dhar dan Ghosh, 1999). Persamaan standar untuk menentukan waktu relaksasinya adalah:

$$\langle \tau_{ii} \rangle = \frac{e \int_0^\infty \tau_{ii} \epsilon^{3/2} \frac{d f}{d \epsilon} d \epsilon}{m^* \int_0^\infty \epsilon^{3/2} \frac{d f}{d \epsilon} d \epsilon} \quad (1) \quad \text{Dengan}$$

menyelesaikan waktu relaksasi ini maka akan diperoleh mobilitas elektron yang telah mengalami hamburan dengan impuritas terionisasi sebagai berikut:

$$\mu_{ii} = \frac{128 \sqrt{2} \pi^{1/2} \epsilon^2 (kT)^{3/2}}{N_I Z^2 e^3 m^{*1/2} [\ln(1+y) - y/(1+y)]} \quad (2)$$

$$y = \frac{24 \epsilon m^* (kT)^2}{\hbar^2 e^2 n}$$

2. Mekanisme Hamburan Impuritas Netral

Mekanisme hamburan ini akan terjadi ketika elektron melewati atom netral, transfer momentum akan terjadi sampai elektron bebas tersebut terikat pada atom. Waktu relaksasi elektron yang mengalami hamburan dengan impuritas netral yaitu:

$$\tau_{ni} = \frac{m^*}{20 N_n \hbar a_0} \quad (3)$$

Sehingga mobilitas elektron yang berhubungan dengan mekanisme hamburan impuritas netral dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\mu_{ni} = \frac{e}{20 N_n \hbar a_0} \quad (4)$$

3 Mekanisme Hamburan Potensial Deformasi

Ketika kristal mengalami vibrasi kisi maka akan terjadi perubahan jarak antar titik kisi yang akan mengakibatkan terjadinya perubahan energi gap bahan. Waktu relaksasi elektron yang

mengalami hamburan akibat adanya potensial deformasi pada kristal yaitu:

$$\tau_{dp} = \frac{\pi \hbar^4 \rho s^2}{\sqrt{2} E_1^2 m^{*3/2} (kT)} \epsilon^{-1/2} \quad (5)$$

Dimana ρ adalah kerapatan kristal, s adalah kecepatan rata-rata bunyi, dan E_1 adalah potensial deformasi (untuk GaN $E_1=9,2$ eV).

Mobilitas elektron yang berhubungan dengan hamburan potensial deformasi dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\mu_{dp} = \frac{2\sqrt{2}\pi^{1/2}\hbar^4\rho s^2 e}{3E_1^2 m^{*3/2} (kT)^{3/2}} \quad (6)$$

4. Mekanisme Hamburan Potensial Piezoelektrik

Dalam mekanisme hamburan potensial piezoelektrik, perubahan energi selama tumbukan adalah kecil sehingga waktu relaksasi elektron selama tumbukan dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\tau_{pe} = \frac{2\sqrt{2}\pi\hbar^2\epsilon}{e^2 p^2 m^{*2} (kT)} \epsilon^{1/2} \quad (7)$$

Dimana $p = \left[\frac{\hbar^2 p_z}{\rho s^2 \epsilon} \right]$ merupakan koefisien

pasangan piezoelektrik dan $\hbar p_z$ adalah konstanta piezoelektrik. Sehingga mobilitas elektron yang berhubungan dengan hamburan potensial piezoelektrik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\mu_{pe} = \frac{16\sqrt{2}\pi^{1/2}\epsilon\hbar^2}{3e p^2 m^{*3/2} (kT)^{1/2}} \quad (8)$$

5. Mekanisme Hamburan fonon optik

Untuk jenis hamburan ini, persamaan waktu relaksasi elektron adalah sebagai berikut:

$$\tau_{po}(\epsilon) = 2^{3/2} \pi \frac{\hbar^2 (e^{T_D/T} - 1) \chi (T_D/T)}{e^2 (kT_D) m^{*1/2} (\epsilon_\infty^{-1} - \epsilon^{-1})} \epsilon^{1/2}$$

Sehingga mobilitas elektron yang berhubungan dengan mekanisme hamburan fonon optik yaitu:

$$\mu_{po} = \frac{2^{9/2} \pi^{1/2} \hbar^2 (kT)^{1/2} (e^{T_D/T} - 1) \chi(T_D/T) \varepsilon^{1/2}}{3 e (kT_D) m^{*3/2} (\varepsilon_{\infty}^{-1} - \varepsilon^{-1})} \quad (9)$$

6. Mekanisme Hamburan Dislokasi

Masalah yang ditemukan dalam penumbuhan film tipis GaN adalah memiliki ketidaksesuaian kisi yang besar dengan substrat. Sehingga akan terbentuk cacat dislokasi. Sehingga waktu relaksasi elektron akibat hamburan dislokasi adalah:

$$\tau = \frac{8(c c_0)^2 a^2 m^{*2}}{N e^4 f^2 L_D} (v_t^2 + \hbar^2 / 4m^{*2} L_D^2)^{3/2}$$

Dimana v_t adalah komponen tegak lurus dislokasi garis, sedangkan a adalah jarak antara pusat tumbukan sepanjang dislokasi garis dan f adalah probabilitas terjadinya tumbukan. Sehingga mobilitas elektron akibat hamburan dislokasi ini yaitu:

$$\mu = \frac{30\sqrt{2\pi}(\varepsilon\varepsilon_0)^2 a^2 (kT)^{3/2}}{e^3 f^2 L_D m^{*1/2} N} m \quad (10)$$

METODE PENELITIAN

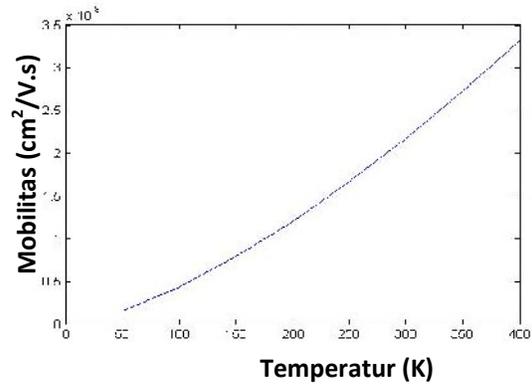
Mobilitas elektron dalam bahan padat yang sangat dipengaruhi oleh berbagai variasi mekanisme hamburan dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan Boltzmann dalam pendekatan waktu relaksasi (τ) sebagai berikut:

$$\mu = \frac{e \langle \tau \rangle}{m^*} \quad (11)$$

dimana $\langle \tau_{AV} \rangle$ adalah waktu relaksasi rata-rata untuk semua peristiwa hamburan yang terjadi, e dan m^* berturut-turut adalah muatan elektron dan massa efektif dari elektron sedangkan μ adalah mobilitas elektron. Rumusan mobilitas elektron tersebut ternyata sangat dipengaruhi oleh profil waktu relaksasi elektron untuk berbagai jenis mekanisme hamburan yang terjadi. Untuk itu maka pada artikel ini akan dibahas mengenai simulasi dari efek hamburan yang mungkin terjadi pada bahan padat seperti semikonduktor GaN terhadap profil mobilitas elektronnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

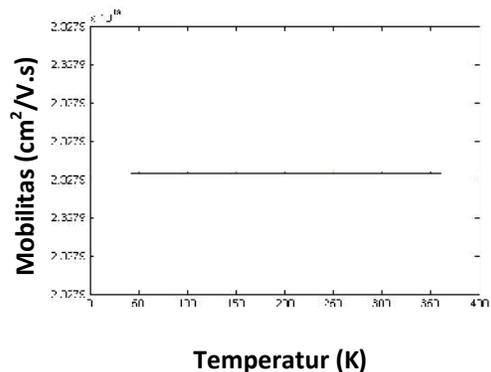
Bentuk visual hasil simulasi dari hubungan fungsional antara mobilitas elektron dengan temperatur lingkungan untuk jenis hamburan impuritas terionisasi yaitu:



Gambar 1. Profil mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan akibat mekanisme hamburan impuritas terionisasi.

Dari gambar 1 di atas nampak bahwa untuk mekanisme hamburan impuritas terionisasi ternyata mobilitas elektron dalam film GaN meningkat seiring dengan peningkatan temperatur lingkungan, hal ini menjelaskan bahwa efek dari impuritas terionisasi terhadap mekanisme hamburan dengan elektron tidak begitu dominan berpengaruh terhadap transport listrik elektron dalam bahan padat.

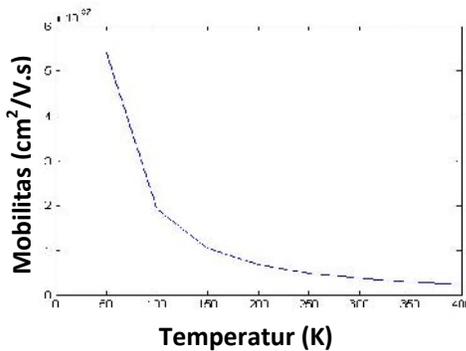
Gambaran visual hasil simulasi persamaan mobilitas elektron sebagai fungsi dari temperatur lingkungan untuk jenis hamburan impuritas netral nampak pada gambar 2. Dari gambaran visual profil mobilitas elektron tersebut nampak bahwa temperatur lingkungan tidak mempengaruhi mekanisme transport listrik elektron dalam bahan padat. Mobilitas elektron pada jenis hamburan ini ternyata hanya dipengaruhi oleh konsentrasi impuritas netral (N_n) dan jari-jari efektif Bohr dari atom impuritas (a_0).



Gambar 2. Profil mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan akibat mekanisme hamburan impuritas netral.

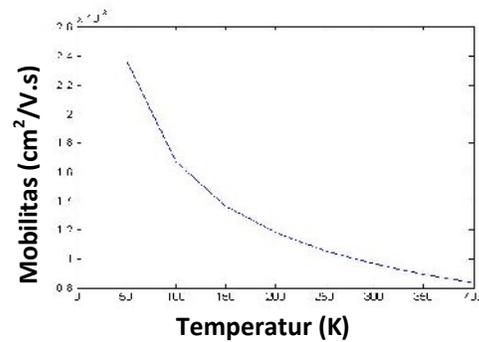
Gambaran visual hasil simulasi persamaan mobilitas elektron sebagai fungsi dari temperatur lingkungan untuk tipe hamburan potensial deformasi nampak pada gambar 3.

Dari gambar 3 tersebut nampak bahwa mobilitas elektron yang mengalami hamburan potensial deformasi dalam kristal mengalami penurunan seiring dengan peningkatan temperatur lingkungan, hal ini disebabkan temperatur lingkungan berpengaruh terhadap frekuensi osilasi dari vibrasi kisi kristal sehingga apabila temperatur ditingkatkan maka mekanisme terbentuknya potensial deformasi semakin besar sehingga akan mengganggu transport listrik elektron dalam bahan.



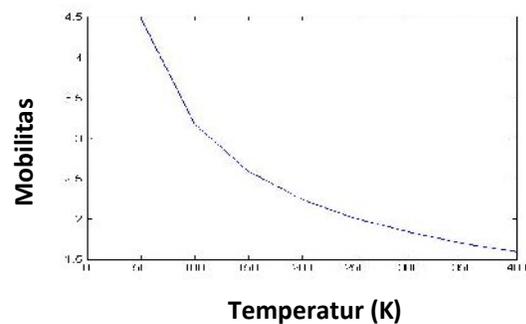
Gambar 3 Profil mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan akibat mekanisme hamburan potensial deformasi.

Gambaran visual hasil simulasi persamaan mobilitas elektron sebagai fungsi dari temperatur lingkungan untuk tipe hamburan potensial piezoelektrik nampak pada gambar 4, dimana mobilitas elektron dalam bahan padat akan mengalami penurunan bila temperatur lingkungan meningkat, hal ini akan berkaitan dengan perubahan dimensi kisi kristal sehingga akibatnya dapat meningkatkan potensial piezoelektrik.



Gambar 4. Profil Mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan akibat mekanisme hamburan potensial piezoelektrik.

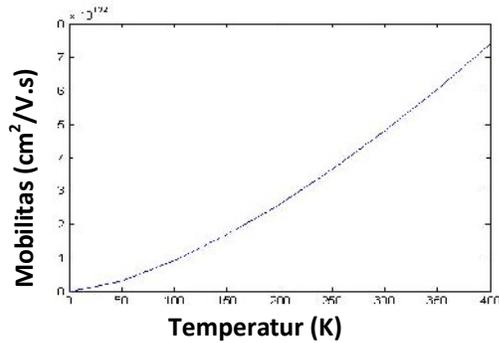
Gambaran visual hasil simulasi persamaan mobilitas elektron tersebut sebagai fungsi dari temperatur lingkungan untuk tipe hamburan fonon optik nampak pada gambar 5, dimana mobilitas elektron dalam bahan padat akan mengalami penurunan bila temperatur lingkungan meningkat, hal ini akan berkaitan dengan vibrasi kisi kristal. Hamburan yang disebabkan oleh vibrasi kisi muncul akibat adanya vibrasi termal dari ion-ion yang dapat mengganggu periodisitas kisi kristal. Fonon-fonon, yang merupakan vibrasi kisi terkuantisasi, dapat didefinisikan sebagai spektrum energi. Ketika pembawa muatan memiliki cukup energi, sangat mungkin untuk mentransfer momentum ke vibrasi kisi tersebut, akibatnya akan terjadi kehilangan energi, sehingga mobilitasnya akan menurun.



Gambar 5. Profil mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur akibat mekanisme hamburan fonon optik.

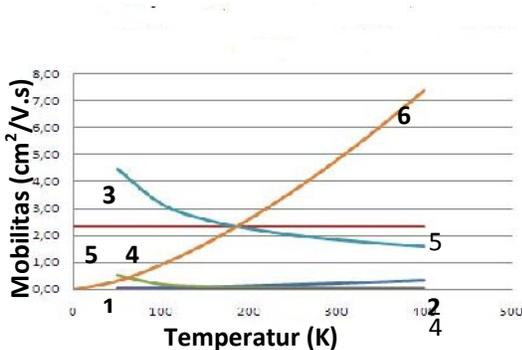
Gambaran visual hasil simulasi persamaan mobilitas elektron sebagai fungsi dari temperatur lingkungan untuk tipe hamburan dislokasi nampak pada gambar 6, dimana mobilitas elektron dalam bahan padat akan

mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan temperatur lingkungan.



Gambar 6. Profil mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan akibat mekanisme hamburan cacat dislokasi.

Profil mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan untuk berbagai tipe mekanisme hamburan seperti impuritas terionisasi, impuritas netral, potensial deformasi, potensial piezoelektrik, fonon optik dan dislokasi direpresentasikan pada gambar 7.



Gambar 7. Variasi mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur untuk mekanisme hamburan potensial deformasi (1), impuritas terionisasi (2), fonon optik (3), potensial piezoelektrik (4), impuritas netral (5) dan dislokasi (6).

Dari gambar tersebut nampak bahwa profil mobilitas elektron dalam GaN bervariasi untuk berbagai tipe mekanisme hamburan. Untuk temperatur lingkungan yang rendah di bawah temperatur ruang, mekanisme hamburan yang paling dominan berpengaruh terhadap penurunan transpor listrik adalah adanya cacat dislokasi pada bahan sedangkan untuk temperatur lingkungan yang tinggi di atas temperatur ruang, mekanisme hamburan yang paling dominan berpengaruh terhadap penurunan transpor listrik bahan adalah adanya mekanisme hamburan elektron akibat adanya vibrasi kisi dan potensial deformasi.

KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan diatas dapat disimpulkan bahwa mobilitas elektron dalam material GaN sangat dipengaruhi oleh temperatur lingkungan hal tersebut akibat pengaruh mekanisme hamburan dalam kristal GaN

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih pada DP2M DIKTI yang telah mendanai proyek penelitian fundamental ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Conwell,E.M., (1967), High Field Transport in Semiconductors, Academic Press, New York,
- [2] Fortini,A., D. Diguët, and J. Lugand, (1970), J. Appl. Phys. 41, 3121
- [3] Hammar,C., and B. Magnusson,(1972), Phys. Scripta 6, 206
- [4] Howarth, D.J., and E. H. Sondheimer, (1953), Proc. Roy Soc. A219, 53
- [5] Kranzer,D., (1974),Phys.Status Solidi A26, 11
- [6] Monroy,E., F. Calle, J. L. Pau, E. Munoz, F. Omnes, B. Beaumont, and P. Gibart,(2001), Application and performance of GaN based UV detector, Phys. Stat. Sol. (a) 185, 91
- [7] Raju,A.R., K. Sardar, C. N. R. Rao,(2001), Mater. Sci. Semicond. Proc. 4
- [8] Schroder,D.K., (1990), *Semiconductor Material and Devices Characterization*, John Wiley & Sons Inc., Canada
- [9] Walker,D., X. Zhang, A. Saxler, P. Kung, J. Xu, M. Razeghi,(1997), Al_xGa_{1-x}N (0<x<1) ultraviolet photodetectors grown on sapphire by metalorganic chemical vapor deposition, Appl. Phys. Lett., 70, 949

