

STUDI PARAMETER PADA DIODA P-N

Fadliondi

Universitas Muhammadiyah Jakarta
e-mail: fadliondi@yahoo.com

Abstrak

Operasi divais semikonduktor bisa diprediksi secara teliti dengan memakai perhitungan. Rumus-rumus perhitungan yang digunakan relatif sederhana. Solusinya bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan Poisson atau model transportasi difusi drif. Untuk mengerti mekanisme dari operasi divais, simulasi perhitungan merupakan cara yang paling cepat. Sementara, struktur dasar dari divais semikonduktor adalah sambungan p-n. Oleh karena itu, tujuan dari tulisan ini adalah untuk menganalisa secara kuantitatif apakah yang terjadi di dalam sambungan p-n ketika parameter-parameter seperti suhu, konsentrasi doping dan tegangan bias diubah-ubah. Efek dari parameter-parameter tersebut telah dihitung. Hasilnya menunjukkan bahwa potensial elektrostatik, medan listrik dan lebar deplesi paling dipengaruhi oleh konsentrasi doping dan tegangan bias.

Katakunci : hubungan p-n, p-n junction, semikonduktor, donor, akseptor

1 Pendahuluan

Hubungan p-n sangat penting pada bidang elektronika dan elektro. Hubungan p-n merupakan struktur dasar dari divais semikonduktor. Karakter rektifikasi dihasilkan oleh perbedaan besar antara arus maju dan arus balik [1]. Penemuan transistor merupakan titik awal dari bidang elektronika saat ini. Hubungan p-n merupakan daerah kontinyu dimana daerah dengan pengotor jenis p dan jenis n bertemu satu sama lain. Deplesi terjadi pada antarmuka hubungan karena ada perbedaan kerapatan [2]. Karena ada perubahan kerapatan yang sangat cepat, pembawa tidak dapat lagi berdifusi dan kondisi kenetralan muatan tidak bisa dipertahankan. Jika kondisi seperti ini terjadi, potensial pada daerah p-n bisa dikontrol dengan mudah dengan memberikan tegangan. Semikonduktor sangat sensitif terhadap temperature. [3]. Untuk merancang dioda dan transistor, sangat penting untuk mengetahui distribusi dari potensial elektrostatik, medan listrik dan kerapatan muatan ruang di dalam divais. Ada juga literatur yang menjelaskan hubungan p-n pada semikonduktor organik. [4]. Sangat penting untuk mengerti pengaruh parameter seperti suhu, konsentrasi doping dan tegangan terhadap lebar deplesi, distribusi potensial elektrostatik, medan listrik dan kerapatan muatan ruang.

2 Penurunan persamaan

Titik awal untuk menganalisa hubungan p-n adalah persamaan Poisson. Persamaan Poisson diberikan oleh persamaan 1. Persamaan Poisson adalah persamaan diferensial yang menjelaskan tentang medan potensial yang diberikan oleh distribusi kerapatan muatan. Persamaan Poisson

adalah tidak bergantung terhadap waktu. ψ adalah potensial elektrostatik dan merupakan fungsi x. ρ adalah fungsi distribusi muatan[5].

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

Ada beberapa cara untuk menyelesaikan persamaan Poisson. Transformasi Laplace adalah salah satunya. Transformasi Laplace untuk fungsi derivatif kedua diberikan oleh persamaan 2.

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2y}{dx^2}\right] = s^2Y - sy(0) - y'(0) \quad (2)$$

Pertama, medan listrik dan distribusi muatan di dalam semikonduktor tipe n diturunkan. Konsentrasi donor N_d menjadi bermuatan positif di dekat hubungan. Jadi persamaan Poisson ada persamaan 1 menjadi persamaan 3.

$$\frac{d^2\psi_1}{dx^2} = -\frac{qN_d}{\epsilon} \quad (3)$$

Lalu, transformasi Laplace diterapkan pada persamaan 3.

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2\psi_1}{dx^2}\right] = s^2\Phi_1 - s\psi_1(0) - \psi_1'(0) = -\frac{qN_d}{\epsilon} \cdot \frac{1}{s} \quad (4)$$

Sekarang, Φ_1 didapatkan dalam fungsi s.

$$\Phi_1 = -\frac{qN_d}{2\epsilon} \cdot \frac{2}{s^3} + \frac{\psi_1(0)}{s} + \frac{\psi_1'(0)}{s^2} \quad (5)$$

Untuk mencari $\psi_1(x)$, transformasi Laplace balik digunakan.

$$\begin{aligned}\psi_1(x) &= \mathcal{L}^{-1}[\Phi_1] \\ &= -\frac{qN_d}{2\varepsilon} \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{2}{s^3}\right] + \psi_1(0)\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s}\right] \\ &\quad + \psi_1'(0)\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2}\right]\end{aligned}\quad (6)$$

Sementara dengan menggunakan matematika teknik dari [6],

$$\mathcal{L}^{-1}\left[\frac{(n-1)!}{s^n}\right] = x^{n-1}\quad (7)$$

Dengan menerapkan persamaan (7) ke persamaan Eq. (6), $\psi_1(x)$ didapatkan di mana $\psi_1(0)$ ada $\psi_1'(0)$ merupakan tetapan yang harus dicari.

$$\psi_1(x) = -\frac{qN_dx^2}{2\varepsilon} + \psi_1'(0)x + \psi_1(0)\quad (8)$$

Karena medan listrik $E_1(x)$ merupakan minus dari turunan fungsi potensial elektrostatik, persamaan 10 didapatkan.

$$E_1(x) = -\psi_1'(x) = \frac{qN_dx}{\varepsilon} - \psi_1'(0)\quad (10)$$

Untuk mencari tetapan $\psi_1'(0)$, medan listrik pada x_n diasumsikan 0 dimana x_n adalah sisi daerah deplesi pada bagian n.

$$E_1(x_n) = \frac{qN_dx_n}{\varepsilon} - \psi_1'(0) = 0\quad (11)$$

Lalu, $\psi_1'(0)$ bisa didapatkan.

$$\psi_1'(0) = \frac{qN_dx_n}{\varepsilon}\quad (12)$$

Untuk mencari $\psi_1(0)$, potensial elektrostatik pada x_n di asumsikan sebagai v_{bi} dimana v_{bi} disebut tegangan *built-in* atau tegangan deplesi.

$$\psi_1(x_n) = -\frac{qN_dx_n^2}{2\varepsilon} + \frac{qN_dx_n}{\varepsilon}x_n + \psi_1(0) = v_{bi}\quad (13)$$

Lalu, $\psi_1(0)$ bisa didapatkan.

$$\psi_1(0) = v_{bi} - \frac{qN_dx_n^2}{2\varepsilon}\quad (14)$$

Akhirnya, potensial elektrostatik $\psi_1(x)$ dan medan listrik $E_1(x)$ bisa dicari untuk daerah deplesi $0 \leq x \leq x_n$.

$$\psi_1(x) = -\frac{qN_d(x^2 - 2x_nx + x_n^2)}{2\varepsilon} + v_{bi}\quad (15)$$

dan

$$E_1(x) = -\psi_1'(x) = \frac{qN_d(x - x_n)}{\varepsilon}\quad (16)$$

Dengan cara yang sama, potensial elektrostatik $\psi_2(x)$ dan medan listrik $E_2(x)$ bisa dicari untuk daerah deplesi $-x_p \leq x \leq 0$. Sementara, $-x_p$ adalah sisi daerah deplesi pada daerah p dan N_a adalah konsentrasi akseptor.

$$\psi_2(x) = \frac{qN_a(x^2 + 2x_px + x_p^2)}{2\varepsilon}\quad (17)$$

dan

$$E_2(x) = -\psi_2'(x) = -\frac{qN_a(x + x_p)}{\varepsilon}\quad (18)$$

Karena, potensial elektrostatik dan medan listrik harus kontinu pada hubungan (pada $x = 0$), from Eq. (15) to Eq. (18), persamaan (19) dan persamaan (20) bisa dicari dengan menggunakan persamaan (15) sampai (18).

$$-\frac{qN_dx_n^2}{2\varepsilon} + v_{bi} = \frac{qN_ax_p^2}{2\varepsilon}\quad (19)$$

dan

$$N_dx_n = N_ax_p\quad (20)$$

Dari persamaan (19) dan persamaan (20), lebar daerah deplesi pada daerah jenis p (x_p) dan lebar daerah deplesi pada daerah jenis n (x_n) bisa didapatkan sebagai berikut.

$$x_n = \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi} N_a N_d}{q(N_a + N_d)}}\quad (21)$$

dan

$$x_p = \frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi} N_a N_d}{q(N_a + N_d)}}\quad (22)$$

Oleh karena itu, total lebar daerah deplesi, W diberikan oleh persamaan 23.

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)}\quad (23)$$

Sementara,

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}\quad (24)$$

n_i adalah konsentrasi pembawa intrinsik di dalam semikonduktor dan merupakan fungsi yang sangat dipengaruhi oleh suhu.

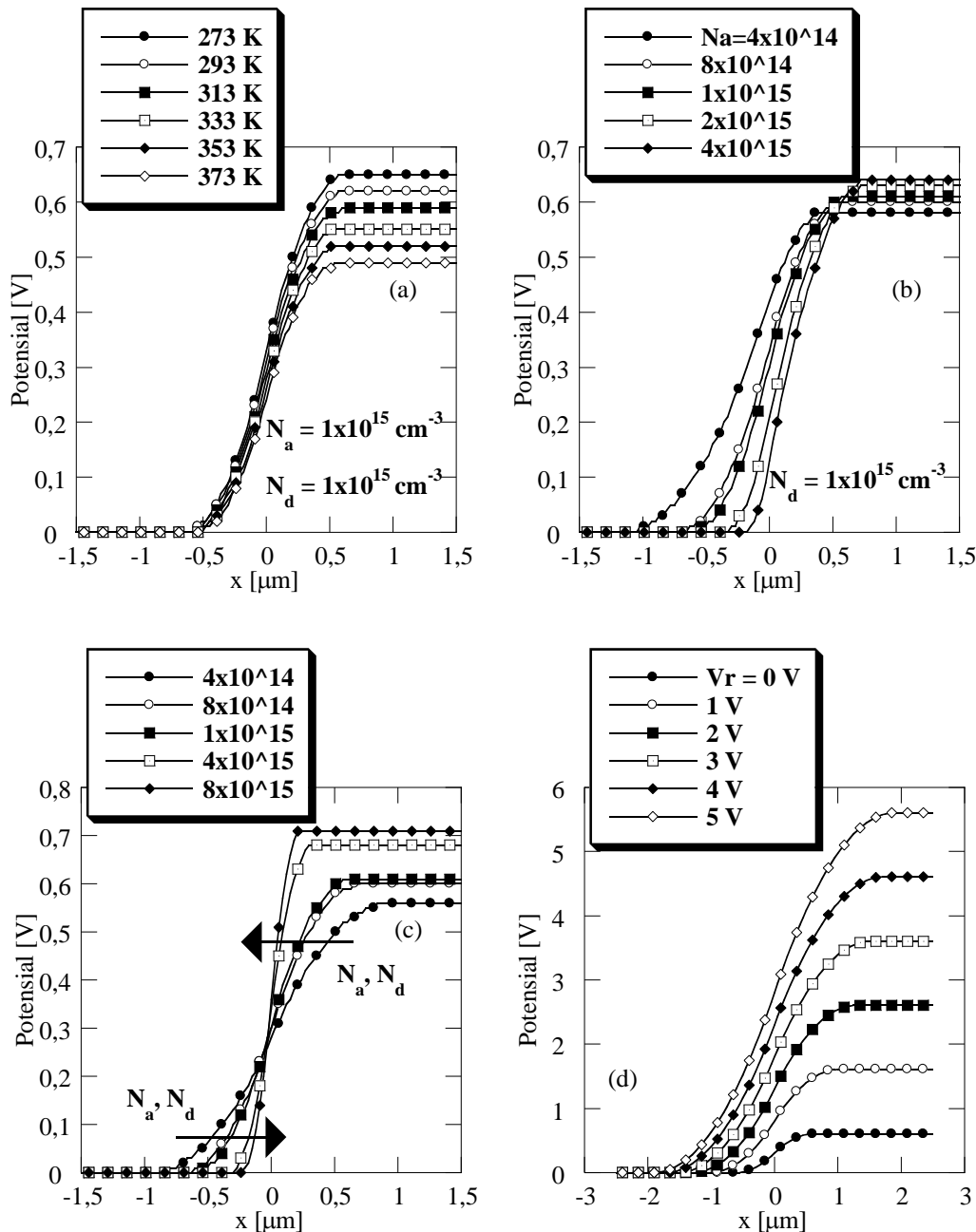
$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (25)$$

N_c dan N_v masing-masing adalah kerapatan keadaan pada bagian bawah pita konduksi dan bagian atas pita valensi. E_g adalah lebar pita terlarang pada semikonduktor.

3 Hasil dan Pembahasan

Untuk mengetahui pengaruh parameter seperti suhu, konsentrasi doping, tegangan di dalam hubungan p-n, ketergantungan potensial elektrostatik, medan listrik dan lebar daerah deplesi terhadap parameter-parameter ini dihitung dengan *Microsoft Excel*. Gbr 1 menunjukkan distribusi potensial elektrostatik ketika suhu, konsentrasi doping dan tegangan panjar mundur diubah. Persamaan yang digunakan untuk Gbr 1 adalah persamaan (15) dan (17). Ketika suhu ditingkatkan dari 273 K ke 373 K, lebar deplesi berkurang dari

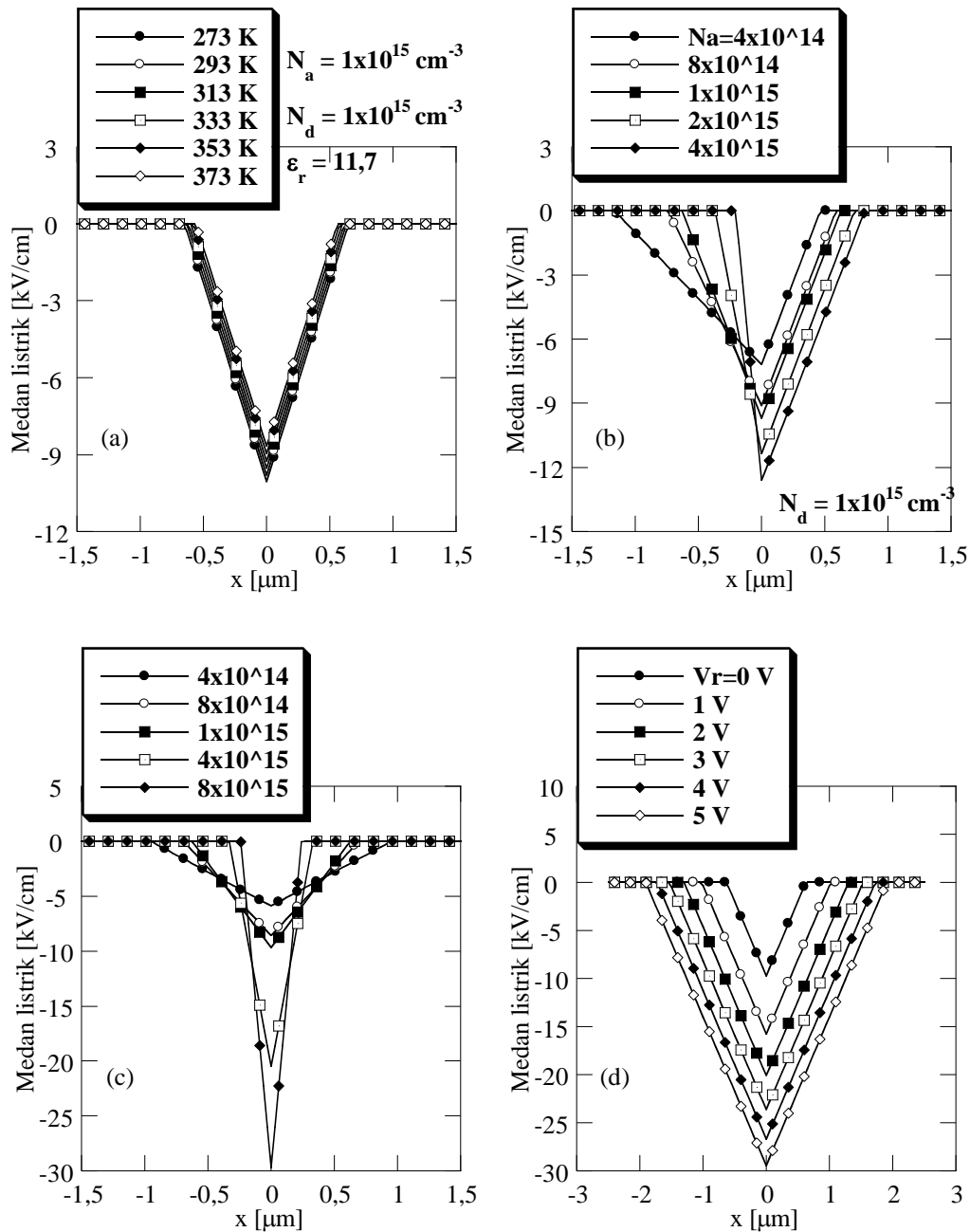
1.3 μm ke 1.1 μm . Potensial elektrostatik pada sisi daerah deplesi di daerah n berkurang dari 0.66 V ke 0.47 V. Jika suhu meningkat, lebar deplesi dan potensial penghalang akan berkurang lagi dan divais bisa menjadi rusak akibat arus bocor [7]. Ketika konsentrasi donor ditetapkan pada $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ dan konsentrasi akseptor dinaikkan dari $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ke $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, lebar lapisan deplesi pada sisi p berkurang dari 1.16 μm ke 0.2 μm dan pada sisi n meningkat dari 0.47 μm ke 0.82 μm . potensial elektrostatik pada sisi daerah deplesi pada sisi n meningkat dari 0.59 V ke 0.64 V. Ketika konsentrasi akseptor dan donor ditingkatkan dari $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ke $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, lebar deplesi di dalam daerah p dan n meningkat dari 0.95 μm ke 0.33 μm . Potensial elektrostatik pada sisi daerah deplesi di dalam daerah n meningkat dari 0.56 V ke 0.68 V. Ketika tegangan panjar maju ditingkatkan dari 0 V ke 5 V, potensial elektrostatik pada sisi daerah deplesi di dalam daerah n meningkat dari 0.61 V ke 5.61 V.



Gbr 1 Distribusi potensial elektrostatis dengan mengubah (a) suhu, (b) konsentrasi, (c) konsentrasi donor dan akseptor (d) tegangan panjar mundur.

Gbr 2 menunjukkan distribusi medan listrik di dalam hubungan p-n ketika suhu, konsentrasi doping dan tegangan panjar mundur diubah. Persamaan yang digunakan untuk Gbr 2 adalah persamaan (16) dan (18). Ketika suhu ditingkatkan dari 273 K ke 373 K, besar medan listrik pada hubungan (pada $x = 0$) berkurang dari 10.1 kV/cm ke 8.5 kV/cm. Ketika konsentrasi akseptor ditingkatkan dari $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ke $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, besar medan listrik pada hubungan (pada $x = 0$) meningkat dari 7.2 kV/cm ke 12.6

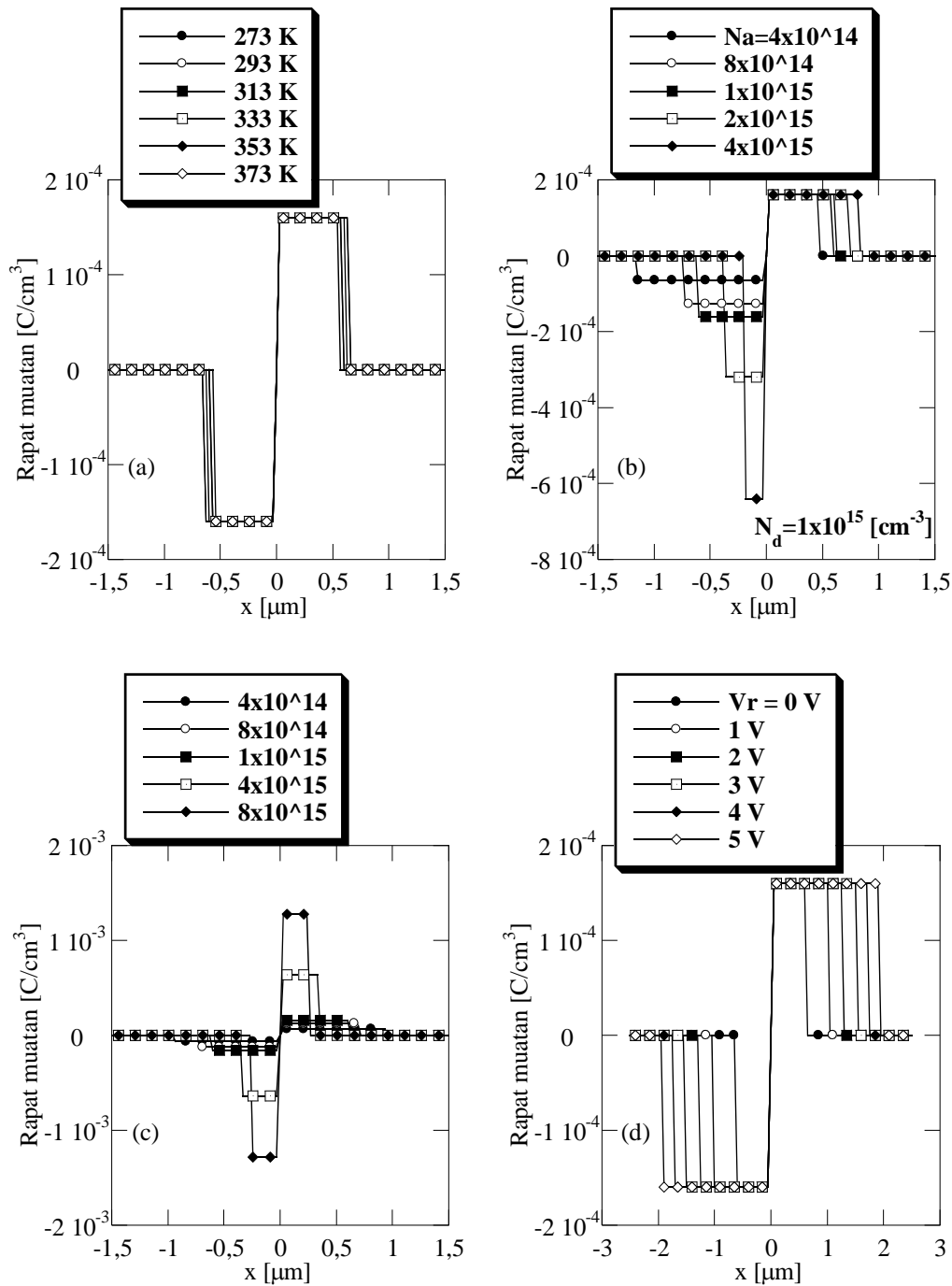
kV/cm. Ketika konsentrasi akseptor dan donor ditingkatkan dari $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ke $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, besar medan listrik pada hubungan (pada $x = 0$) meningkat dari 5.9 kV/cm ke 20.5 kV/cm. Ketika tegangan panjar mundur ditingkatkan dari 0 V ke 5 V, besar medan listrik pada hubungan (pada $x = 0$) meningkat dari 9.7 kV/cm ke 29.4 kV/cm. Silikon memiliki medan listrik *break down* sebesar 500 kV/cm dan jika medan listrik lebih besar dari harga tersebut, efek tunnel akan terjadi [8].



Gbr 2 Distribusi medan listrik dengan mengubah (a) suhu, (b) konsentrasi, (c) konsentrasi donor dan akseptor (d) tegangan panjar mundur.

Gbr 3 menunjukkan distribusi kerapatan muatan ruang di dalam hubungan p-n ketika suhu, konsentrasi doping dan tegangan panjar mundur diubah. Ketika suhu meningkat dari 273 K ke 373 K, kerapatan muatan ruang tidak mengalami perubahan dari $-1.6 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^3$ di sisi p ($1.6 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^3$ di sisi

n), tetapi lebar deplesi berkurang. Ketika konsentrasi akseptor ditingkatkan dari $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ke $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, kerapatan muatan ruang berubah dari $-6.4 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^3$ ke $-6.4 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^3$.



Gbr 3 Kerapatan muatan ruang dengan mengubah (a) suhu, (b) konsentrasi, (c) konsentrasi donor dan akseptor (d) tegangan panjar mundur.

4 Kesimpulan

Bisa disimpulkan bahwa potensial elektrostatik, medan listrik, lebar deplesi, paling dipengaruhi oleh konsentrasi doping dan tegangan yang diberikan. Ketika konsentrasi doping ditingkatkan, lebar lapisan deplesi berkurang, besar potensial elektrostatik dan medan listrik meningkat. Ketika besar tegangan panjar mundur ditingkatkan, lebar lapisan deplesi bertambah, besar potensial

elektrostatik dan medan listrik juga bertambah. Bagaimanapun juga, ada sedikit perubahan pada potensial elektrostatik ketika suhu berubah. Ketika suhu bertambah, lebar lapisan deplesi, besar potensial elektrostatik dan medan listrik berkurang.

Daftar Pustaka

Seung Chang Lee et al., Journal of Applied Physics 114 (2013) p.064502.

Koki Shiota et al., International Conference On Nano-Electronic Technology Devices And Materials, Selangor, Malaysia, 2015, vol. 1733.

C. R. Crowell et al., Appl. Phys. Lett. , 9(1966) p.242.

Yohei Yamashina, Journal of Applied Physic 117 (2015).

Donald E. Neamen, Semiconductor Physics and Devices Basic Principles, N.Y., 2003, p.243.

Erwin Kreyszig, Advanced Engineering Mathematics, Wiley, New Jersey, 2006, p.265.

R. Hall, International Journal of Electronics 22 (1967) p. 513-519.

Sze, S. M., Semiconductor Devices Physics and technology, John Wiley and Sons, N.Y., 2002, p.120.