

## Pencirian Ruang Jalur Fotonik Nanorod Silikon (Photonic Bandgap Characterization of Silicon Nanorods)

MOHAMMAD SYUHAIMI AB-RAHMAN, NOOR AZIE AZURA MOHD ARIF\* & SAHBUDIN SHAARI

### ABSTRAK

*Hablur fotonik menjadi tarikan dalam bidang sains dan teknologi berikutan cirinya yang unik. Kajian ini bertujuan untuk menentukan struktur jalur hablur fotonik akibat perubahan saiz nanorod silikon. Kajian dijalankan dengan menggunakan perisian Bandsolve RSoft. Perisian ini menggunakan pendekatan Plane Wave Expansion Method (PWEM) bagi mengira struktur jalur fotonik. Saiz nanorod silikon yang digunakan adalah dari 0.5  $\mu\text{m}$  hingga 0.05  $\mu\text{m}$ . Hasil yang didapati menunjukkan hanya pada saiz 0.1  $\mu\text{m}$  sehingga 0.4  $\mu\text{m}$  sahaja yang mempamerkan kawasan jalur terlarang.*

*Kata kunci: Hablur fotonik; jalur terlarang; nanorod silikon*

### ABSTRACT

*Photonic crystals become more attractive in science and technology because of their unique properties. The objective of this research was to study the effect of the size of silicon nanorod in the photonic band structure. This research was carried out by using the RSoft Bandsolve software. This software uses the Plane Wave Expansion Method (PWEM) to calculate the band structure of photonic crystal. The silicon nanorods used in this work ranged from 0.05  $\mu\text{m}$  to 0.5  $\mu\text{m}$ . The results showed that band structure has a forbidden band for nanorod with size from 0.1 to 0.4  $\mu\text{m}$ .*

*Keywords: Forbidden band; photonic crystals; silicon nanorod*

### PENGENALAN

Bahan dengan indeks biasan berkala yang mempamerkan ciri-ciri ruang jalur optik dikenali sebagai hablur fotonik (Liddell et al. 2003; Liddell & Summers 2004; Lourtioz et al. 2005; Paras 2004). Hablur fotonik boleh mengemudikan cahaya dalam satu arah seperti semikonduktor memanipulasikan elektron. Hal ini menjadi perhatian sejak dekad yang lalu seperti dinyatakan oleh Chang et al. (2004) dan King et al. (2005). Kajian terdahulu menunjukkan bahawa terdapat kebarangkalian bagi menentukan pengurangan foton dan penindasan kadar pancaran spontan dalam 3 dimensi hablur fotonik. Pelbagai usaha telah dijalankan untuk menghasilkan peranti hablur fotonik. Dalam hablur fotonik, ketelusan dielektriknya mengalami perubahan berkala. Oleh itu, hablur fotonik dijangka menawarkan pelbagai aplikasi yang menarik dalam bidang fotonik mahupun elektronik (Chang et al. 2005).

Kebanyakan pengkaji lebih berminat dan fokus kepada hablur nano-fotonik berikutan kelebihanannya dalam menghadkan laluan cahaya, memandu cahaya pada sudut  $90^\circ$  dan dapat menghasilkan peranti dengan ciri optik seperti penuras dan pemultipleksan (Bienstman et al. 2003; Ye et al. 2002). Tambahan pula, proses salutan basah bagi menghasilkan hablur nano-fotonik digunakan dengan meluas. Selain itu, bahan hablur fotonik boleh menghasilkan LED, laser, dan peranti optik, elektronik dan elektronik kuantum (Liddell et al. 2003).

Struktur jalur bagi hablur fotonik menerangkan ciri-ciri optiknya seperti pantulan dan perambatan (Paras 2004). Oleh itu, pelbagai prosedur telah dilakukan bagi menentukan struktur jalur tersebut. Salah satu teknik yang sesuai digunakan adalah menggunakan kaedah kembangan gelombang satah (PWEM) yang terdapat dalam perisian Bandsolve RSoft. Kaedah ini mengaplikasikan persamaan Maxwell dalam penentuan struktur jalur hablur fotonik. Kaedah PWEM diaplikasikan untuk mendapatkan lengkungan penyerakan sepanjang zon Brillouin. Tambahan lagi, kaedah ini menggunakan medan elektrik,  $E$  dan medan magnet,  $H$  sebagai perwakilannya. Dalam artikel ini, kajian dilakukan ke atas nanorod silikon bagi menentukan kesannya ke atas ruang jalur hablur fotonik menggunakan perisian Bandsolve RSoft. Hablur fotonik ini dikaji dengan mengubah saiz silikon bagi mempamerkan struktur ruang jalur hablur fotonik.

### KOMBINASI PERSAMAAN MAXWELL DENGAN KAEDAH PWEM

Persamaan Maxwell menjadi permulaan bagi memahami pengiraan berkaitan struktur hablur fotonik (Andries et al. 2002; Johnson & Joannopoulos 2003; Paras 2004). Di sini, huraian secara ringkas diberikan melalui pengiraan struktur jalur dengan menggunakan kaedah PWEM. Satu struktur hablur fotonik dicirikan dengan ketelusan dielektrik  $\epsilon_r$ . Hablur fotonik yang diaplikasikan dalam semikonduktor memenuhi persamaan Maxwell yang merangkumi

ketumpatan medan elektromagnet,  $B$ , kekuatan medan elektrik,  $E$ , ketumpatan medan elektrik,  $D$ , dan kekuatan medan elektrik,  $H$ . Manakala  $J$  adalah ketumpatan arus,  $t$  adalah masa dan  $q$  adalah ketumpatan cas.

PWEM merupakan kaedah yang terbaik bagi menentukan struktur jalur. Contoh kombinasi ringkas yang dapat diterangkan adalah hablur fotonik satu dimensi. Kita mempertimbangkan perambatan gelombang hanya bergerak pada satu arah iaitu dalam arah  $+x$ . Dengan satu dimensi yang menggunakan pengembangan  $E$ . Arif et al. (2008) menunjukkan bahawa:

$$\frac{1}{\epsilon_r} \left( -\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y - \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_y \right) = \frac{\omega^2}{c^2} E_y$$

#### KAEDAH

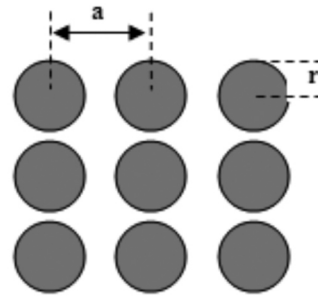
Perisian Bandsolve RSoft yang menggunakan pendekatan *Kembangan Gelombang Satah* (PWEM) telah digunakan untuk menghitung kesan perubahan saiz nanorod silikon terhadap jalur fotonik. Saiz nanorod silikon bertindak sebagai pembolehubah dan nilai bagi jejari yang digunakan adalah seperti Jadual 1. Rajah 1 menerangkan parameter yang digunakan dalam kajian ini.

JADUAL 1. Hasil analisis dengan perubahan saiz nanorod silikon

Jejari, $r$ ( $\mu\text{m}$ )	$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$\omega a/2\pi c$	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
0.50	1.0	-	-
0.45	1.0	-	-
0.40	1.0	0.59-0.63	1.69-1.58
		0.40-0.43	2.50-2.32
		0.24-0.26	4.16-3.85
0.35	1.0	0.65-0.70	1.54-1.43
		0.42-0.49	2.38-2.04
		0.25-0.29	4.00-3.45
0.30	1.0	0.87-0.88	1.15-1.14
		0.46-0.56	2.17-1.79
		0.26-0.34	3.85-2.94
0.25	1.0	0.76-0.78	1.32-1.28
		0.53-0.58	1.88-1.72
		0.29-0.39	3.45-2.56
0.20	1.0	0.33-0.44	3.03-2.27
0.15	1.0	0.85-0.87	1.18-1.15
		0.39-0.48	2.56-2.08
0.10	1.0	0.48-0.50	2.08-2.00
0.05	1.0	-	-

#### HASIL DAN PERBINCANGAN

Polarisasi *Medan Magnet Ricih* TM dan *Medan Elektrik Ricih* TE dalam Rajah 2 dapat dilabelkan dengan lengkungan ' $x$ ' dan lengkungan titik. Rajah 2 menunjukkan hasil daripada struktur jalur hablur fotonik dengan paksi mendatar merupakan vektor gelombang sepanjang zon Brillouin



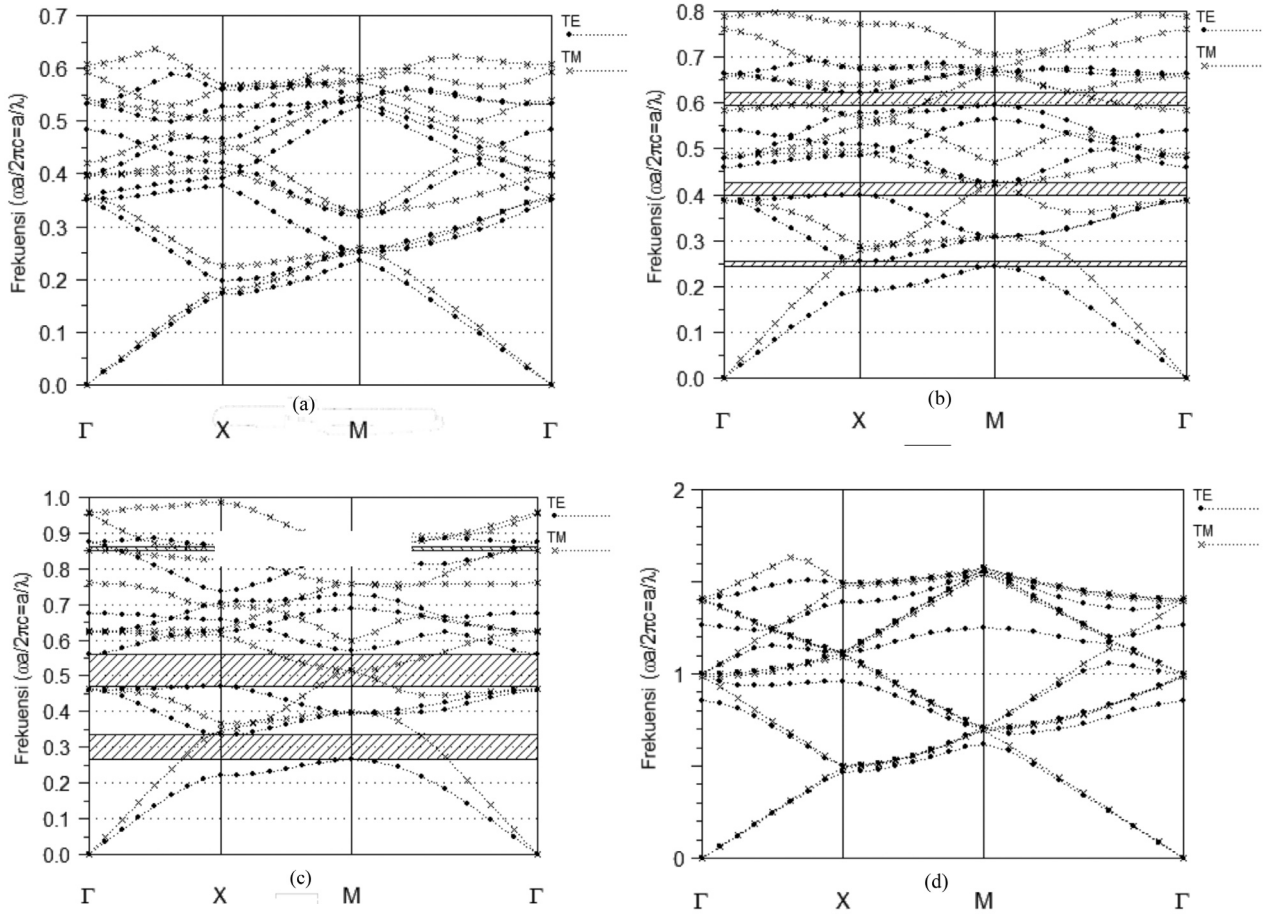
RAJAH 1. Nanorod silikon dengan jejari,  $r$  dan  $a$  merupakan jarak antara dua nanorod

manakala paksi menegaknya merupakan frekuensi normal. Frekuensi normal ini dinyatakan sebagai  $\omega a/2\pi c$  atau  $a/\lambda$  dengan  $c$  merupakan halaju cahaya dan  $\lambda$  pula merupakan panjang gelombang optik (Bienstman et al. 2003).

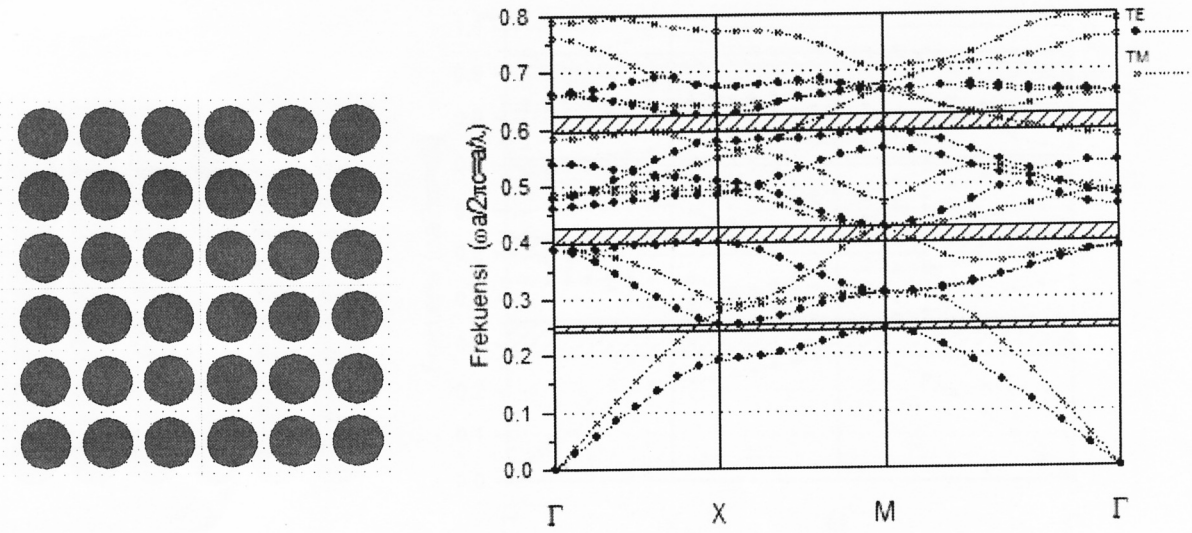
Berdasarkan Rajah 2, dilihat corak polarisasi TE dan TM bagi nanorod silikon adalah berlainan dan begitu juga dengan kawasan gelap. Kawasan gelap merupakan ruang jalur terlarang. Dalam hablur fotonik, ciri yang unik adalah kawasan gelap yang mana kawasan ini dapat menentukan aplikasi yang akan digunakan dalam penciptaan peranti optik dan elektronik.

Dalam nanofotonik, sifat cahaya dalam skala nano dikaji. Rajah 2(b) dan Rajah 2(c) menunjukkan struktur ruang jalur yang terdapat kawasan gelap berbanding dengan Rajah 2(a) dan Rajah 2(d). Rajah 2(a) menunjukkan nanorod silikon menghampiri dalam keadaan pukal dan menyebabkan sifat cahaya tidak dapat dikesan. Dalam Rajah 2(b) dan Rajah 2(c), lebar kawasan gelap ini adalah berbeza. Ini bergantung pada kesan penggunaan saiz dan juga jarak nanorod silikon antara satu sama lain. Saiz yang terlalu kecil juga menyebabkan tiada jalur terlarang kelihatan seperti Rajah 2(d). Menurut Johnson (2001), jika saiz dan juga bentuk silikon yang dipilih adalah betul, kemungkinan cahaya yang dipantulkan dan dibiarkan akan terhapus tetapi cahaya tersebut akan terus bergerak. Jika cahaya tersebut terus bergerak dan tidak dapat dipantulkan semula, maka terhasil jalur fotonik terlarang. Berdasarkan struktur ruang jalur yang terhasil, julat panjang gelombang daripada julat frekuensi normal bagi kawasan gelap boleh didapati.

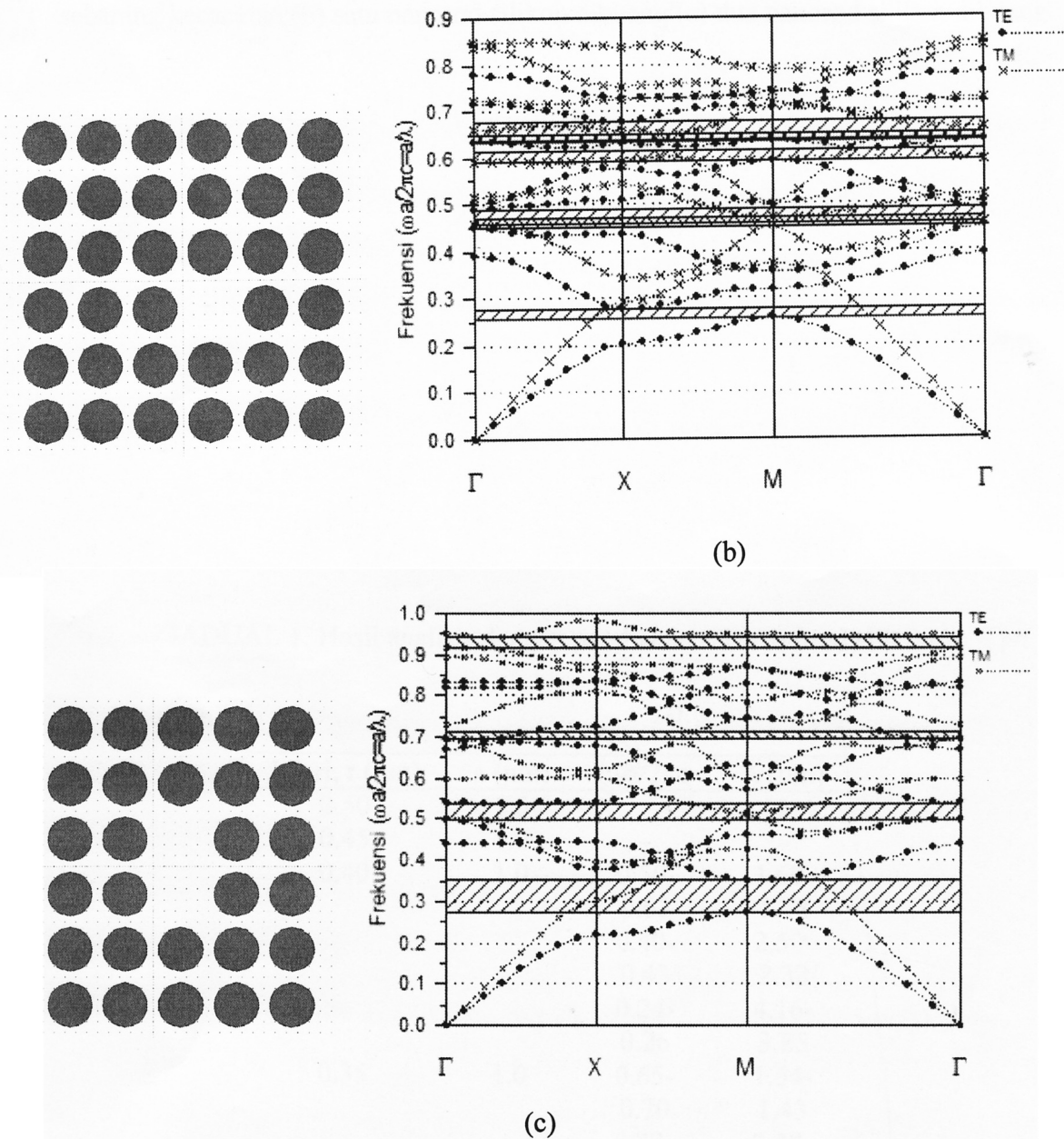
Aplikasi peranti yang ingin ditentukan adalah berdasarkan julat panjang gelombang. Julat panjang gelombang yang sering digunakan dalam bidang optik dan elektronik adalah dalam julat ruang jalur komunikasi. Kajian struktur jalur hablur fotonik ini, dapat diteruskan dengan membuat kecacatan pada nanorod silikon dengan membesarkan atau mengecilkan saiz nanorod silikon tersebut atau mungkin dengan membuang satu nanorod silikon. Rajah 3 menunjukkan satu contoh kesan daripada kecacatan nanorod silikon yang dihasilkan. Kecacatan yang dilakukan dengan membuang satu dan dua nanorod silikon. Hasil daripada kecacatan ini, memberi kesan terhadap struktur jalur hablur fotonik. Didapati dengan membuang satu nanorod silikon, multi julat jalur terlarang terhasil



RAJAH 2. Struktur jalur bagi nanorod silikon dengan saiz jejaringnya (a)  $0.5 \mu\text{m}$ , (b)  $0.4 \mu\text{m}$ , (c)  $0.30 \mu\text{m}$  dan (d)  $0.05 \mu\text{m}$



(a)



RAJAH 3. Struktur jalur bagi nanorod silikon dengan saiz jejarnya (a) nanorod silikon tanpa sebarang kecacatan (b) satu nanorod silikon dibuang (c) dua nanorod silikon dibuang

manakala dengan membuang dua nanorod silikon, hanya empat julat jalur terlarang terhasil dengan saiz julat yang kecil. Ini membuktikan bahawa, setiap kecacatan yang dihasilkan akan menghasilkan perubahan pada struktur jalur hablur fotonik. Kecacatan yang dibuat ini boleh menghasilkan aplikasi seperti penurasan dan multipleks.

#### KESIMPULAN

Secara khususnya, penentuan struktur jalur hablur fotonik bergantung kepada beberapa faktor seperti saiz, jarak antara hablur fotonik, susunan hablur fotonik, bentuk hablur fotonik dan sebagainya. Dalam kajian ini, hablur

fotonik diterangkan dengan perubahan saiz nanorod silikon. Saiz nanorod silikon memberi kesan terhadap struktur jalurnya dan hanya pada saiz  $0.1 \mu\text{m}$  sehingga  $0.4 \mu\text{m}$  sahaja yang mempamerkan kawasan jalur terlarang. Saiz nanorod silikon yang menghampiri  $0.05 \mu\text{m}$  tidak menunjukkan kawasan jalur terlarang dan begitu juga dengan saiz  $0.5 \mu\text{m}$ .

#### RUJUKAN

- Andries, M.J. 2002. Silicon Photonic Crystal and Spontaneous Emission. Ph. D. Thesis Utrecht University.  
 Arif, N.A.A.M., Rahman, M.S.A. & Shaari, S. 2008. The Influence of dielectric in one dimensional (1D) photonic

- crystal band structure: case study. *Proceedings of Student Conference on Research and Development*. 191-1-191-4.
- Bienstman, P., Assefa, S., Johnson, S.G. & Joannopoulos, J.D., Petrich, G.S. & Kolodziejski, L. A. 2003. Taper structures for coupling into photonic crystal slab waveguide. *J. Opt. Soc. Am.* 20: 1817-1821.
- Chang, X., Cao, J., Ji, H., Fang, B., Feng, J., Pan, L., Zhang, F. & Wang, H. 2005. Solvothermal Synthesis of 3D Photonic Crystals Based On ZnS/Opal System. *Materials Chemistry and Physics* 89: 6-10.
- Johnson, S.G. 2001. Photonic crystals: From theory to practice. Tesis PhD. Massachusetts Institute of Technology.
- Johnson, S.G. & Joannopoulos, J.D. 2003. Introduction to Photonic Crystal: Bloch's Theorem, Band Diagrams and Gaps. <http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/photonic-intro.pdf>.
- King, J.S., Heineman, D., Graugnard, E. & Summers, C.J. 2005. Atomic Layer Deposition In Porous Structures: 3D Photonic Crystals. *Applied Surface Science* 244: 511-516.
- Liddell, C.M., Summers, C.J. & Gokhale, A.M. 2003. Stereological estimation of the morphology distribution of ZnS clusters for photonic crystal applications. *Material Characterization* 50: 69-79.
- Liddell, C.M. & Summers, C.J. 2004. Nonspherical ZnS colloidal building blocks for three-dimensional photonic crystal. *Journal of Colloid and Interface* 274: 103-106.
- Lourtioz, J.M., Benisty, H., Berger, V., Gerard, J.M., Maystre, D. & Tchelnokov, A. 2005. *Photonic Crystals*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Paras, N.P. 2004. *Nanophotonics*. New Jersey: Wiley-Interscience.
- Ye, Y.H., Mayer, T.S., Khoo, I.C., Divliansky, I.B., Abrama, N. & Mallouk, T.E. 2002. Self-assembly of three-dimensional photonic-crystals with air-core line defects. *J. Mater. Chem.* 12: 3637-3639.
- Mohd Syuhaimi Ab Rahman, Noor Azie Azura Binti Mohd Arif\*  
 Jabatan Elektrik, Elektronik & Sistem  
 Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina  
 Universiti Kebangsaan Malaysia  
 43600 Bangi Selangor D.E.  
 Malaysia
- Sahbudin Shaari  
 Institute Kejuruteraan Mikro & Nanoelektronik (IMEN)  
 Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina  
 Universiti Kebangsaan Malaysia  
 43600 Bangi Selangor D.E.  
 Malaysia
- \*Pengarang untuk surat-menyurat; email: azieazura\_1985@hotmail.com
- Diserahkan: 14 Januari 2009  
 Diterima : 4 September 2009