

## Pembangunan Bahan Fotopeka Silika Terdop Fosforus untuk Fabrikasi Pandu Gelombang Optik

(Development of Phosphorus Doped Silica Photosensitive Material for Optical Waveguide Fabrication)

MOHD SYUHAIMI AB-RAHMAN\*, HADI GUNA & SAHBUDIN SHAARI

### ABSTRAK

*Kajian ini dijalankan untuk membangunkan pandu gelombang optik menggunakan bahan fotopeka silika terdop fosforus. Teknik penyalutan mejam menggunakan sumber berbentuk cecair iaitu tetraetil ortosilikat, asid fosforik dan juga PBF untuk menghasilkan pandu gelombang fotopeka silika terdop fosforus dan boron. Pada ketebalan antara 1  $\mu\text{m}$  hingga 8  $\mu\text{m}$ , modulasi indeks biasan yang ditunjukkan di dalam bahan fotopeka silika terdop fosforon-boron adalah  $1 \times 10^{-14}$  pada ketebalan 3  $\mu\text{m}$  hingga 8  $\mu\text{m}$ . Semua ujian dan rawatan fotopeka dilakukan dengan menggunakan sumber UV 366 nm, 0.369 mW/cm<sup>2</sup> pada kadar denyutan 50 Hz. Semua sampel menunjukkan penurunan nilai indeks di bawah dedahan ini. Tempoh dedahan yang diperlukan dengan menggunakan kuasa UV yang berkenaan adalah kira-kira 10 minit. Dengan menggunakan penyuir laser ArF atau KrF yang berkuasa 10 mW misalnya, tempoh dedahan yang diperlukan adalah cuma 20 hingga 30 saat untuk mengubah indeks biasan pandu gelombang. Selain daripada itu, proses pemampasan juga dimasukkan yang bertujuan untuk memperbetulkan semula prestasi akibat daripada kesan toleransi semasa proses simulasi. Bagi memberikan kecekapan dalam pengukuran indeks biasan dan ketebalan lapisan BPSG, satu program antara muka penggunaan grafik dibangunkan untuk mempercepatkan dan meningkatkan kejituan bacaan yang diukur daripada pengganding prisma manual.*

*Kata kunci: Migrasi; OXADM; rangkaian cincin; rangkaian jejaring; BER*

### ABSTRACT

*This research was conducted to develop an optical waveguide made from phosphorus doped silica photosensitive material. The spin coating technique was conducted using a source in liquid form called tetraethyl orthosilicate, phosphoric acid and also PBF to produced phosphorus doped silica photosensitive waveguide and boron. In range between 1  $\mu\text{m}$  and 8  $\mu\text{m}$  thickness, the doped silica photosensitive waveguide, showed refractive index modulation is reaching  $1 \times 10^{-14}$  between 3 and 8  $\mu\text{m}$  thickness. For each testing and photosensitive treatment process was run using a 366 nm UV source, 0.369 mW/cm<sup>2</sup> at 50Hz pulse rate. For every samples produced from this exposure shows a deviation of their index value, which the UV exposure was held about 10 minutes. By using ArF or KrF laser inscriber with 10 mW power for example, exposure period needed was just between 20 to 30 seconds to change the refractive index of waveguide. Beside, compensation process also held to improve the performance due to the tolerance effect from the simulation process. In order to improve the efficiency of refractive index and the layer thickness of BPSG, a graphical user interface program has been successfully developed to accelerate and improve the accuracy of reading measured from manual prism coupler.*

*Keywords: Mesh network; migration; OXADM; ring network*

### PENGENALAN

Fotopeka dalam gentian optik merujuk kepada perubahan indeks biasan yang kekal di dalam teras gentian atau pandu gelombang apabila ianya didedahkan kepada sinaran dengan panjang gelombang tertentu yang mempunyai kesan langsung atas bahan teras bagi gentian tersebut (Othonos & Kalli 1999). Pada awalnya, fotopeka ini dianggap sebagai satu fenomena perubahan indeks biasan yang terjadi di dalam gentian optik yang mempunyai ketepuan atom germanium yang tinggi di dalam terasnya apabila didedahkan dengan sinaran UV pada panjang gelombang 240 – 250 nm sahaja (Hill et al. 1978; 1991).

Walau bagaimanapun selepas beberapa tahun penyelidikan dilakukan, dapat difahami bahawa bahan fotopeka ini sensitif kepada dedahan sinaran UV pada berbagai panjang gelombang yang bergantung kepada bahan teras gentian optik tersebut (Othonos & Kalli 1999). Tetapi kebanyakan bahan-bahan ini tidak mempunyai atom germanium sebagai dopan dan sesetengahnya tidak mempunyai atom germanium langsung (Bennion et al. 1996). Namun begitu, gentian optik dengan dopan germanium masih merupakan bahan yang penting dalam fabrikasi peranti-peranti yang berasaskan bahan fotopeka. Sifat fotopeka di dalam gentian optik dan pandu gelombang adalah penting kerana

diperlukan untuk penghasilan jeriji *Bragg* yang merupakan komponen penting dalam komunikasi optik. Gantian jeriji *Bragg* merupakan satu revolusi baru dalam sistem telekomunikasi optik dan juga merupakan elemen yang amat penting dalam penerima optik (Butler et al. 1999).

Dalam mencari bahan yang paling sesuai sebagai dopan untuk menghasilkan fotopeka di dalam silika, germanium telah didapati berjaya menunjukkan sifat-sifat peka terhadap cahaya (Othonos & Kalli 1999). Selain daripada itu, germanium juga sesuai dijadikan bahan dopan untuk teras atau pandu gelombang kerana sifatnya dapat meningkatkan indeks biasan bahan berkenaan. Jeriji *Bragg* tidak dapat disurih pada pandu gelombang gantian silika tulen, ini adalah kerana kumpulan-kumpulan ion hidroksil adalah tidak peka terhadap cahaya (Stone 1987). Tetapi jika didopkan dengan germanium bersama boron, kawasan fotopeka yang bermodulasi indeks yang lebih besar daripada  $10^{-3}$  dapat diperolehi (Poumellecy et al. 1996). Selain daripada germanium terdapat juga dopan lain yang sesuai untuk membentuk kawasan fotopeka seperti europium, cerium dan juga erbium tetapi tahap kepekaan mereka adalah tidak setinggi bahan silika yang didopkan dengan germanium (Bilodeau et al. 1990; Bilodeau et al. 1993). Fotopeka juga dapat diperhatikan di dalam gantian silika fluorozirkonat yang didopkan dengan erbium ataupun cerium di mana terdapatnya jeriji *Bragg* yang dilukiskan di atas kaca jenis ini dengan menggunakan sinaran UV 246 nm (Niay et al. 1994; Williams et al. 1997). Walau bagaimanapun, pada masa ini banyak peranti jeriji *Bragg* untuk telekomunikasi dan penerima optik menggunakan germanium yang didopkan bersama boron sebagai dopan utama untuk pembentukan bahan pekacahaya (Othonos & Kalli 1999).

Pada awalnya, kawasan fotopeka di dalam gantian optik terdop germanium mula dipercayai disebabkan terjadinya satu fenomena kecacatan pada kekisi atom oksigen-germanium seperti pembentukan ikatan yang salah Ge-Ge di mana ia bertanggungjawab dalam pembentukan teraruh cahaya yang memberi kesan kepada perubahan indeks biasan (Othonos & Kalli 1999). Setelah beberapa kajian dijalankan, ternyatalah bahawa fotopeka ini adalah fungsi dari berbagai mekanisme seperti fotokimia, fotomekanikal, termokimia di samping merupakan fungsi dari intensiti dan juga panjang gelombang sinar (Othonos & Kalli 1999). Beberapa model telah digunakan untuk menerangkan bagaimana perubahan indeks biasan di dalam gantian yang didopkan dengan germanium berlaku akibat penyinaran UV. Bagaimanapun ini telah menyokong teori kecacatan pada kekisi atom germanium-oksigen oleh foton UV sebagai elemen yang bertanggungjawab kepada perubahan indeks biasan. Semasa proses pengoksidaan fasa gas suhu tinggi menggunakan teknik MCVD,  $\text{GeO}_2$  diasingkan kepada molekul GeO disebabkan oleh kestabilan yang besar yang terjadi pada suhu yang tinggi. Dalam keadaan penggabungannya yang membentuk kaca, jalur penyerapannya adalah pada 240 nm – 250 nm dengan puncak penyerapan 242 nm dan pusat ini dipanggil pusat

kekurangan atom oksigen germanium (GODCs). GODCs inilah yang bertanggungjawab membentuk jeriji-jeriji *Bragg* apabila bahan didedahkan dengan sinaran UV pada panjang gelombang berkenaan (Othonos & Kalli 1999; Williams et al. 1993a).

#### MEKANISME FOTOPEKA : MODEL DWI-KUTUB ELEKTRIK KEKAL

Model dwi-kutub ini berasaskan kepada pembentukan ruang medan cas elektrik secara bertempoh oleh rangsangan foto dari sinaran UV. Proses pengionan foto ke atas GODC, Ge-Si, atau Ge-Ge akan membentuk cas positif pusat lubang  $\text{GeE}'$  dan elektron bebas. Kecacatan ini adalah tetap manakala elektron bebas akan mempunyai tenaga yang mencukupi untuk bebas, meresap jauh dan terperangkap di dalam kawasan  $\text{Ge}^{(1)}$  dan  $\text{Ge}^{(2)}$  untuk membentuk cas negatif  $\text{Ge}^{(1)-}$  dan  $\text{Ge}^{(2)-}$  secara berasingan (Williams et al. 1993b). Lubang yang terperangkap  $\text{GeE}'$  dan elektron yang terperangkap  $\text{Ge}^{(1)-}$  dan  $\text{Ge}^{(2)-}$  menghasilkan dwi-kutub elektrik dengan ruang dalam julat beberapa Angstrom. Setiap dwi-kutub tersebut akan menghasilkan medan berkutub statik DC yang mengembangkan banyak panjang molekul. Sebagai contohnya, pada jarak 1 nm daripada pusat dwi-kutub nilai medan elektrik adalah lebih kurang  $E=145 \text{ V/mm}$  untuk saiz dwi-kutub 0.3 nm. Medan elektrik statik ini akan merangsang indeks biasan setempat supaya berubah secara berkadar langsung kepada  $E_2$  melalui kesan DC Kerr. Semasa proses penulisan jeriji *Bragg* dilakukan, iaitu apabila gantian atau pandu gelombang didedahkan kepada corak gangguan UV, elektron-elektron bebas dalam kawasan berintensiti rendah akan meresap sehinggalah mereka terperangkap oleh kecacatan di kawasan yang berkeamatan rendah. Taburan cas-cas di dalam pandu gelombang inilah yang mewujudkan ruangan cas medan elektrik yang bertempoh. Indeks biasan yang bertempoh ini berubah secara langsung kepada  $X_{(3)}E_2$ , dengan  $X_{(3)}$  ialah pemalar tak linear tertib ketiga dan  $E$  adalah skalar bagi medan elektrik daripada sumber dwi-kutub. Perubahan pada indeks biasan dikesan oleh mod yang merambat dan kemudiannya perubahan indeks biasan ini diambil sebagai purata kepada isipadu kecacatan. Model dwi-kutub ini sebahagiannya diinspirasikan dari model pembiasan foto di dalam hablur di mana terdapat anjakan fasa sebanyak  $\pi/2$  untuk indeks biasan relatif terhadap corak gangguan bagi sinaran UV. Hand dan Russell (1990) telah menganggarkan sebanyak  $1026 \text{ m}^{-3}$  dwi-kutub diperlukan untuk perubahan indeks  $2 \times 10^{-4}$  pada ketumpatan molekul  $2.2 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ , di mana bilangan kecacatan mestilah beberapa kali ganda tinggi nilainya berbanding nilai yang dianggarkan dari eksperimen.

#### LAPISAN FOTOPEKA SILIKA TERDOP FOSFORUS

Selain dari germanium, fosforus juga merupakan bahan dopan yang terbaik dalam pembangunan lapisan fotopeka. Ini adalah kerana tahap kelarutan ion-ion bumi adalah jarang tinggi berbanding dengan bahan germanosilikat.

Tahap kepekaan terhadap cahaya untuk bahan silika terdop fosforus akan meningkat apabila ianya didopkan dengan atom-atom lain seperti boron, ion jarang bumi, aluminium dan germanium. Dalam projek fabrikasi ini boron dipilih sebagai bahan dopan kedua kerana ianya berfungsi dalam mengganggu kekisi atom-atom silika dan fosforus apabila ianya didedahkan dengan sinaran UV. Fenomena inilah yang menjadikan indeks biasan berubah-ubah semasa penulisan jeriji dilakukan. Atom boron berfungsi untuk memberi ketegangan kepada kekisi silika dan fosforus dan menyebabkan indeks biasan bahan tersebut menurun. Setelah dedahan sinaran UV dilakukan, ketegangan yang disebabkan oleh atom-atom boron ini menjadi kendur/longgar melalui pemecahan-pemecahan ikatan yang salah akibat dari sinaran UV dan menyebabkan indeks biasan bahan tersebut meningkat semula (Othonos & Kalli 1999). Dalam projek fabrikasi lapisan silika terdop fosforus dan kodop boron, beberapa bahan kimia dalam bentuk cecair digunakan iaitu *tetraethyl orthosilicate* sebagai sumber silikon, asid fosforik sebagai sumber fosforus dan oksigen dan bahan polimer PBF sebagai sumber boron. Kaedah yang digunakan ialah teknik penyalutan mejam.

#### KAEDAH FABRIKASI

Kaedah fabrikasi yang digunakan dalam menjalankan kajian ini dimulakan dengan pencampuran cecair *tetraethyl orthosilicate* dan asid fosforik dengan kepekatan tertentu ke dalam bikar dengan nisbah 1:1 dan dibiarkan seketika untuk tindak balas berlaku. Kemudian cecair PBF dicampurkan dengan sukatan tertentu mengikut peratusan yang dikehendaki ke dalam bikar tadi. Gelangsar kaca atau wafer silikon dibersihkan dan diletakkan di atas pentas peralatan penyalut mejam. Seterusnya, campuran tadi dititiskan ke atas substratum sehingga kesemua permukaan substratum dilitupi dengan cecair campuran tadi. Kemudian, proses penyalutan dilakukan yang mana nilai rpm dan masa putaran ditetapkan mengikut spesifikasi bahan fotopeka yang dikehendaki. Setelah itu, sampel-sampel dikeringkan di atas plat pemanas pada suhu 300°C.

Parameter yang digunakan untuk proses pemendapan lapisan silikon terdop fosforus dan kodop boron (BPSG) menggunakan teknik Penyalutan mejam ditunjukkan dalam Jadual 1.

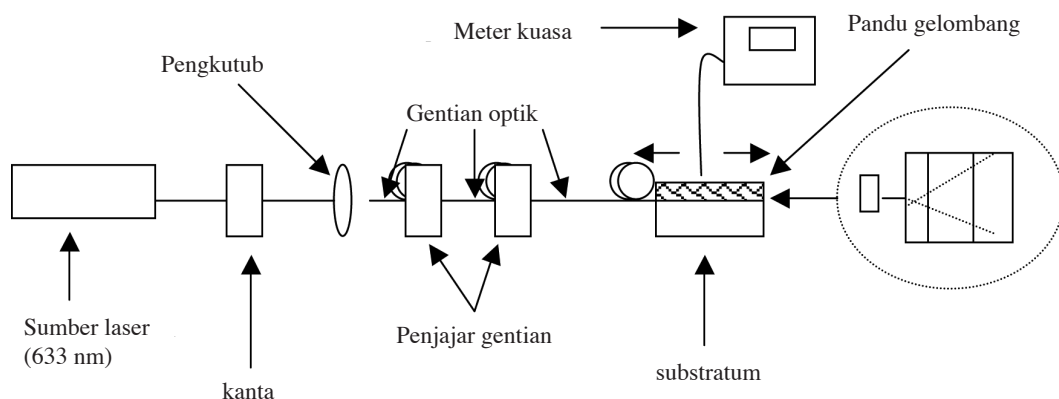
JADUAL 1. Parameter pemendapan untuk teknik Penyalutan mejam

Bahan	Nilai
<i>Tetraethyl orthosilicate</i>	30 titis (43%)
Asid fosforik	30 titis (43%)
PBF	10 titis (14%)
Suhu	300°C
Kadar Putaran	1000-2500 rpm
Masa Putaran	10 saat

#### PENCIRIAN PANDU GELOMBANG

##### PENGGANDING PRISMA

Rangkaian sistem dalam yang ditunjukkan oleh Rajah 1 merupakan alat yang digunakan untuk mendapatkan susuk sinar laser He-Ne dan kehilangan dalam pandu gelombang satah. Sinar laser He-Ne 633 nm yang dipandu oleh gentian optik mod tunggal digandingkan ke pandu gelombang satah. Sinar yang keluar dari gentian optik berkenaan dipastikan ianya ialah LP01 bersusuk *Gaussian* dan terlebih dahulu ditentukan pengutuban TE atau TM sebelum gandingan dibuat. Sebahagian kecil daripada kuasa yang dipandu oleh pandu gelombang satah di seluruh permukaannya akan menghasilkan serakan yang dikesan oleh gentian optik polimer. Kuasa serakan permukaan adalah kecil di sekitar beberapa pW jika kuasa yang masuk ke pandu gelombang di sekitar beberapa mW. Kehilangan atau pengecilan dalam perambatan (dB/cm) dapat ditentukan dengan mudah jika susuk pada rentasan a dan rentasan b diketahui. Dengan menggunakan prisma, sinar juga berupaya digandingkan ke dalam pandu gelombang dengan mudah. Dengan



RAJAH 1. Eksperimen bagi pemprofil mod

mencerapkan sudut bagi dua mod yang berturutan, nilai indeks biasan dan ketebalan penolakan dapat ditentukan dengan memplotkan graf ketebalan melawan indeks biasan untuk mod-mod tersebut. Biasanya setiap bacaan mengambil bacaan yang lama (hampir 40 min) tetapi dengan pembangunan program berasaskan MATLAB™ ianya dapat membantu dan memberikan bacaan yang tepat kurang daripada satu minit sahaja. Dua program berasingan dibangunkan masing-masing untuk mencirikan pandu gelombang mod tunggal dan pelbagai ragam. Dengan adanya perisian ini proses pencirian pandu gelombang dapat dijalankan dengan lebih cepat dan tepat.

PERISIAN PENCIRIAN SUBSTRATUM UNTUK PENGKANDING PRISMA

Masukkan parameter input seperti sudut masukan, indeks biasan teras dan pelapisan serta panjang gelombang yang merambat dalam pandu gelombang tersebut ke dalam kotak dialog, hasil pengiraan akan dipaparkan pada kotak paparan.

Contoh parameter masukan:

- Sudut masukan = 84°
- Indeks biasan teras = 3.6
- Indeks biasan pelapisan = 3.55
- Panjang gelombang perambatan = 1330 nm

Hasil daripada simulasi yang dijalankan disenaraikan dalam kotak paparan. Di sini nilai-nilai seperti indeks biasan berkesan, nilai mod Te0 hingga Te9 dan ketebalan lapisan kedua-dua pandu gelombang indeks langkah dan bergred yang merambat akan dipamerkan.

a. Pandu gelombang indeks langkah

Data-data yang diperolehi dari pengukuran pengkanding prisma dimasukkan ke dalam kotak dialog masukan (*input dialog box*).

Contoh data pengukuran:

- Mod = 0
- Sudut masukan prisma pada mod 0 = 3° 26'
- Mod = 1
- Sudut masukan prisma pada mod 1 = 1° 10'

Kesemua parameter output untuk kedua-dua mod seperti indeks biasan berkesan, graf ketebalan substratum melawan indeks biasan dan titik persilangan untuk kedua-dua graf tersebut, nilai indeks biasan sebenar dan juga nilai ketebalan sebenar substratum yang diukur dijalankan oleh perisian yang dibangunkan.

Hasil daripada pengiraan tersebut dipaparkan pada kotak paparan (*display box*) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Ketepatan bacaan yang diambil juga diperolehi daripada simulasi perisian ini. Semakin kecil julat nilai dx dan dy, semakin tepat bacaan yang diperolehi.

b. Pandu gelombang Indeks Bergred

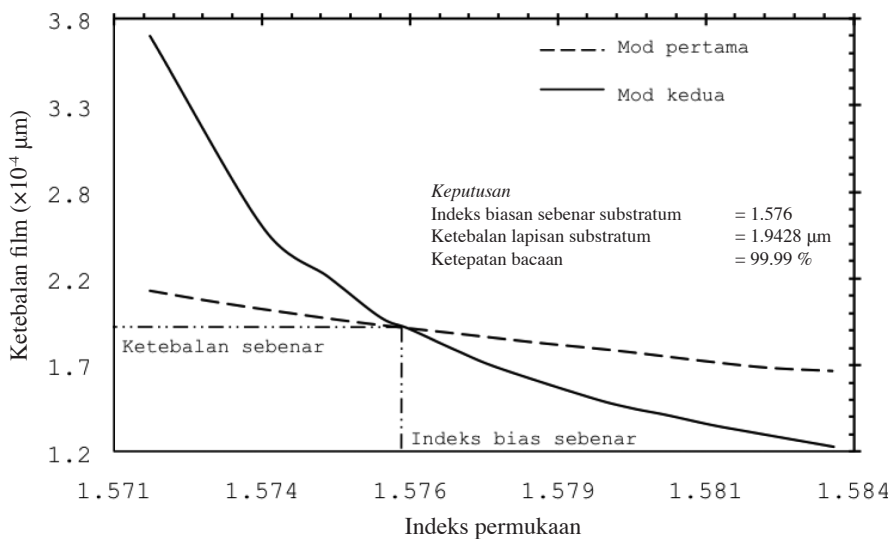
Data-data yang diperolehi dari pengukuran pengkanding prisma dimasukkan ke dalam kotak dialog masukan (*input dialog box*).

Contoh data pengukuran:

- Mod = 0
- Sudut masukan prisma pada mod 0 = 0° 22'
- Mod = 1
- Sudut masukan prisma pada mod 1 = -1° 20'

Kesemua parameter untuk kedua-dua mod seperti indeks biasan berkesan, graf ketebalan substratum melawan indeks biasan dan titik persilangan untuk kedua-dua graf tersebut, nilai indeks biasan sebenar dan juga nilai ketebalan sebenar untuk substratum yang diukur dijalankan oleh perisian yang dibangunkan.

Hasil daripada pengiraan tersebut di paparkan pada kotak paparan (*display box*) seperti yang ditunjukkan



RAJAH 2. Kotak paparan yang memaparkan keputusan dari pencirian pandu gelombang langkah

dalam Rajah 3 di bawah. Ketepatan bacaan yang diambil juga diperolehi daripada simulasi perisian ini. Semakin kecil julat nilai dx dan dy, semakin tepat bacaan yang diperolehi.

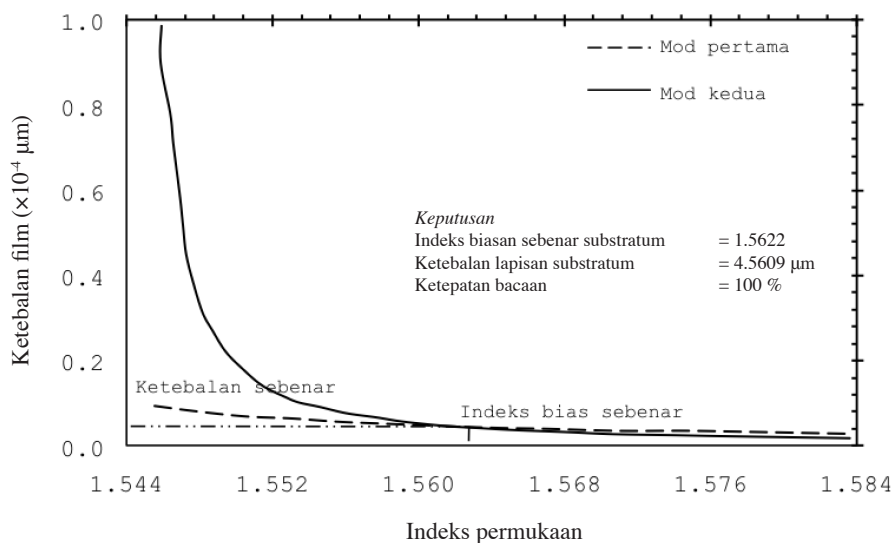
#### HASIL DAN PERBINCANGAN

Setelah ujian UV dilakukan ke atas tiga sampel terpilih didapati nilai indeks biasannya menurun dengan kadar perubahan yang kecil terhadap peningkatan tempoh dedahan UV. Sampel-sampel didedahkan dengan sinaran UV dengan panjang gelombang 366 nm dan tempoh dedahan selama 120 min. Bagi setiap 30 min pertama, nilai indeks biasan diukur menggunakan pengganding prisma. Daripada analisis graf yang diperolehi, didapati pada bacaan 30 min pertama, nilai indeks biasan menurun dengan mendadak dan pada masa ini indeks biasan tersebut belum dikatakan berada dalam keadaan stabil. Sebenarnya pada tempoh ini, sampel-sampel perlulah menjalani rawatan UV untuk menstabilkan nilai indeks biasannya. Setelah rawatan UV dijalankan, barulah proses penulisan jeriji dilakukan. Nilai modulasi indeks sampel BPSG yang dibangunkan di atas silika ialah sekitar  $1 \times 10^{-4}$ . Untuk sampel yang dirawat dengan rawatan haba (sebelum rawatan UV), perubahan nilai indeks biasan (modulasi indeks) yang berlaku ialah sekitar  $1 \times 10^{-3}$ . Gandaan kenaikan pada nilai modulasi indeks ini ialah 10 kali ganda. Oleh itu rawatan haba juga penting dalam meningkatkan tahap kepekaan terhadap foto sesuatu sampel (Worhoff 1999). Begitu juga dengan rawatan UV, ianya diperlukan untuk menstabilkan nilai indeks biasan sampel BPSG sebelum jeriji-jeriji *Bragg* disurihkan. Secara teorinya, nilai modulasi indeks biasan untuk bahan yang didopkan dengan atom fosforus ialah sekitar  $2 \times 10^{-4}$  hingga  $7 \times 10^{-4}$  dan nilai ini menghampiri dengan hasil eksperimen yang telah diperolehi (Lemaire et

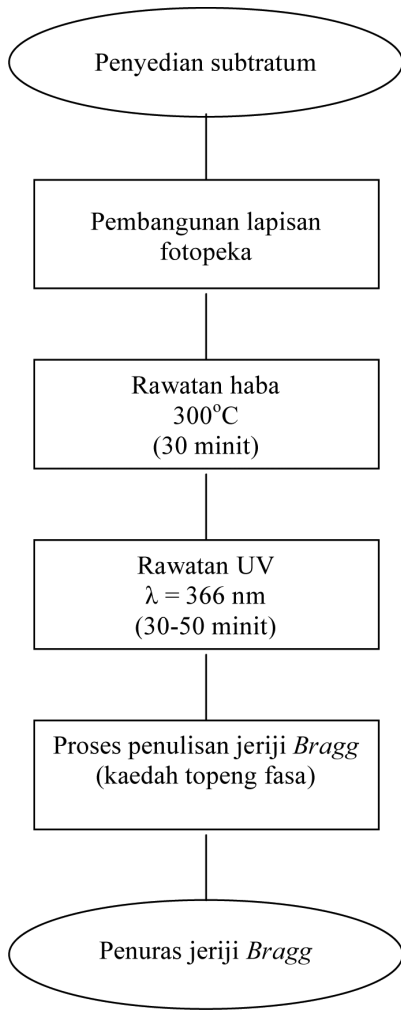
al. 1993a; Lemaire et al. 1993b; Malo et al. 1994). Rajah 4 menunjukkan carta alir untuk fabrikasi penuras jeriji *Bragg*. Rajah 5 dan 6 pula masing-masing menunjukkan tempoh sesuai untuk menjalankan rawatan UV dan proses penyurihan jeriji *Bragg* untuk bahan fotopeka BPSG.

Setelah ujian rawatan haba dilakukan ke atas sampel-sampel silika dop fosforus kodop boron di dapati bahan tersebut mempunyai ciri yang berubah terhadap suhu dan haba persekitaran. Atau dengan kata lain BPSG ini merupakan bahan habapeka yang baik. Indeks biasan BPSG ini meningkat dengan peningkatan suhu dedahan dan ketebalannya menurun dengan peningkatan suhu persekitaran. Sebanyak tiga sampel iaitu sampel berkod F3, F4 dan F5 di letakkan di atas plat pemanas dan dipanaskan dengan suhu daripada julat  $100^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ . Berdasarkan perubahan ciri yang berlaku ke atas sampel BPSG, kita dapat menyimpulkan bahawa kaedah campuran terus bahan kimia untuk pembentukan lapisan BPSG merupakan salah satu kaedah untuk penghasilan lapisan silika di atas silika. Lapisan yang terbentuk bukanlah lapisan polimer disebabkan kestabilan lapisan tersebut yang didedahkan dengan suhu setinggi  $400^{\circ}\text{C}$ . Biasanya kebanyakan polimer akan mengalami proses penurunan apabila didedahkan dengan suhu melebihi  $300^{\circ}\text{C}$ . Selain daripada itu, BPSG yang dimendapkan di atas silika menggunakan teknik Penyalutan mejam juga stabil terhadap perubahan (suhu) persekitaran. Ini adalah kerana peningkatan suhu dalam julat yang besar hanya memberi kesan atau perubahan yang kecil sahaja kepada nilai ketebalan dan juga indeks biasan lapisan BPSG.

Teknik penyalutan mejam yang digunakan ini merupakan satu teknik yang unik, murah, ringkas dan memerlukan tempoh fabrikasi yang singkat. Teknik ini menggunakan sumber kimia dalam bentuk cecair untuk membentuk pandu gelombang fotopeka silika terdop



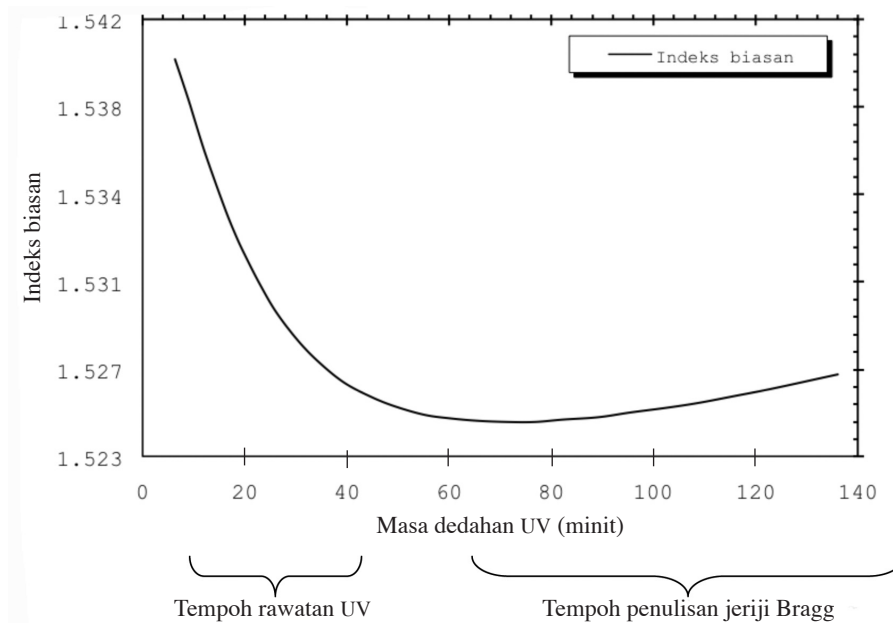
RAJAH 3. Kotak paparan yang memaparkan hasil simulasi pandu gelombang bergred yang dicirikan



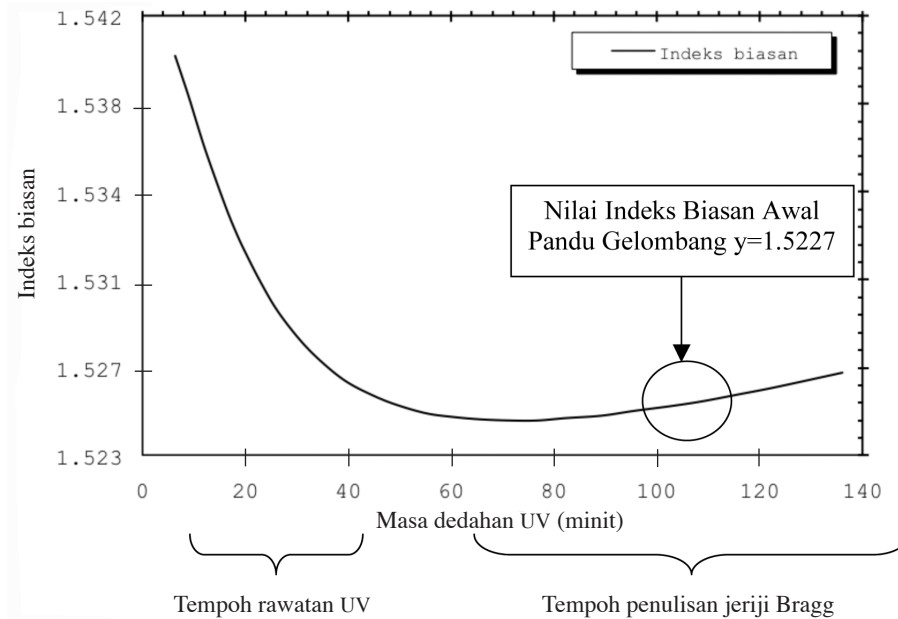
RAJAH 4. Carta alir untuk proses fabrikasi pandu gelombang penuras jeriji Bragg menggunakan kaedah topeng fasa

fosforus dan kodop boron. Teknik ini lebih mudah dan ringkas berbanding teknik pemendapan PECVD yang memerlukan kos penyediaan dan penyelenggaraan yang cukup tinggi. Selain daripada itu, apa yang menarik di sini ialah kaedah campuran bahan kimia yang digunakan ini merupakan kaedah campuran terus di mana ketiga-tiga bahan kimia dicampurkan bersama sebelum diletakkan di atas pentas pemutar. Secara logiknya kaca BPSG tidak dapat dihasilkan menggunakan kaedah ini dan kemungkinan lapisan yang terbentuk merupakan lapisan polimer. Dengan mencampurkan asid fosforik pekat dan larutan *tetraetil ortosilikat* ke dalam sebuah bikar dan kemudian campuran tersebut dicampurkan pula dengan larutan polimer PBF dan proses Penyalutan mejam dijalankan, lapisan yang terbentuk merupakan lapisan kaca silika terdop fosforus dan kodop boron. Setelah diuji menggunakan ujian haba dan ujian serapan UV, ternyatalah bahan yang dibangunkan merupakan kaca dan bukannya polimer disebabkan kestabilannya pada suhu tinggi dan serapan pada panjang gelombang 240 nm hingga 250 nm. Bahan yang dibangunkan ini merupakan kaca borofosfosilikat (BPSG).

Daripada pemerhatian yang dilakukan pada Rajah 7 dan 8, kadar perubahan pada nilai indeks biasan terhadap perubahan suhu ialah berada dalam julat  $10^{-5}$  dan nilai ini terlalu kecil dan begitu juga dengan kadar perubahan ketebalan terhadap suhu dedahan iaitu berada dalam julat  $0.01 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ . Di sini, boleh dianggapkan bahawa walaupun perubahan yang berlaku adalah secara linear, tetapi perubahan ini adalah dalam julat yang terlalu kecil dan ini menunjukkan lapisan BPSG yang dibangunkan merupakan lapisan silika yang stabil dan ianya sesuai dijadikan elemen dalam penuras jeriji Bragg boleh laras dan juga kegunaan penderia-penderia.



RAJAH 5. Tempoh rawatan UV dan tempoh sesuai penulisan jeriji dilakukan untuk pandu gelombang tanpa rawatan haba (sampel D4)



RAJAH 6. Tempoh rawatan UV dan tempoh sesuai penulisan jeriji dilakukan untuk pandu gelombang dengan rawatan haba (sampel F4)

#### SILIKON TERDOP FOSFOROS DAN KODOP BORON (BPSG)

Setelah uji kaji, pemerhatian dan analisis dilakukan ke atas lapisan silikon terdop fosforus dan kodop boron yang telah dibangunkan di atas silika dan silikon, di dapati ianya merupakan bahan fotopeka dan habapeka baik. Beberapa ujian iaitu ujian UV dan juga ujian haba dilakukan ke atas lapisan-lapisan BPSG yang mendapatkan di atas silika untuk menguji rangsangannya terhadap cahaya dan juga haba. Dari ujian UV yang dilakukan di dapati indeks biasan BPSG berubah dengan tempoh dedahan UV. Walaupun perubahan yang berlaku ini tidak ketara ( $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$ ) tetapi secara teorinya ianya perlu melalui satu peringkat yang dinamakan rawatan hidrogen untuk meningkatkan tahap kepekaan foto bahan tersebut dan sinaran UV yang digunakan untuk proses penulisan jeriji mempunyai panjang gelombang 244 nm dan mempunyai kadar denyutan yang tinggi. Walau bagaimanapun, perubahan kecil yang berlaku ini menunjukkan bahawa berlakunya tindak balas atau penstrukturan semula kekisi atom BPSG apabilanya ianya didedahkan dengan sinaran UV. Telah dilaporkan setakat ini oleh Malo et al. (1994) modulasi indeks biasan bagi gentian fotopeka BPSG ialah  $2 \times 10^{-4}$  bagi penulisan UV menggunakan sumber 193 nm dan  $7 \times 10^{-4}$  bagi penulisan UV menggunakan sumber laser 248 nm (Lemaire et al. 1993a; Lemaire et al. 1993b). Bahan fotopeka BPSG untuk pandu gelombang belum lagi dibangunkan setakat ini kerana para penyelidik terkini lebih cenderung menggunakan teknik pemendapan dan punaran untuk membentuk jeriji-jeriji Bragg yang mana tidak memerlukan bahan fotopeka dan sumber sinaran UV dalam fabrikasinya seperti InGaAsP dan silika terdop fosforus (Butler et al. 1999; Murphy et al. 2000).

Analisis juga dilakukan ke atas lapisan BPSG yang dibangunkan di atas silika menggunakan haba persekitaran yang tinggi. Didapati indeks biasan dan ketebalan lapisan BPSG berubah secara linear dan eksponen masing-masing terhadap peningkatan haba persekitaran. Jadual 2 mempamerkan spesifikasi lapisan BPSG yang dihasilkan.

Teknik penyalutan mejam yang digunakan ini merupakan satu teknik yang unik, murah, ringkas dan memerlukan tempoh fabrikasi yang singkat. Teknik ini menggunakan sumber kimia dalam bentuk cecair untuk membentuk pandu gelombang fotopeka silika terdop fosforus dan kodop boron. Teknik ini lebih murah dan ringkas berbanding teknik-teknik lain seperti pemendapan PECVD atau LPCVD yang memerlukan kos penyediaan dan penyelenggaraan yang cukup tinggi. Kaedah campuran terus bahan kimia telah digunakan dengan mencampurkan ketiga-tiga cecair kimia iaitu *tetraetil ortosilikat*, asid fosforik pekat dan PBF sebelum diletakkan di atas pentas pemusingan penyalut mejam. Teknik Penyalutan mejam menggunakan kaedah campuran terus bahan kimia ini boleh digunakan dalam penghasilan lapisan silika terdop fosforus dan kodop boron di atas substratum silika.

Kesimpulan daripada kajian ini ialah silika terdop fosforus dan kodop boron (BPSG) merupakan bahan fotopeka dan habapeka yang baik yang tidak memerlukan atom germanium tetapi memerlukan rawatan haba dan rawatan hidrogen dalam meningkatkan tahap kepekaannya terhadap cahaya.

#### KESIMPULAN

Setelah ujian dan rawatan UV dilakukan ke atas sampel BPSG, didapati terdapat perubahan pada nilai indeks biasan

JADUAL 2. Spesifikasi lapisan BPSG yang dibangunkan di atas silika

Spesifikasi	BPSG
Kaedah	Penyalutan mejam
Teknik campuran	Campuran terus
Bahan Kimia	Kuantiti
<i>Tetraetil ortosilikat (98%)</i>	43%
Asid Fosforik (10% - 60%)	43%
PBF	14%
Kadar putaran	1000 – 2500 rpm
Masa putaran	10 saat
Indeks biasan	1.5141 – 1.544
Ketebalan	2.7 – 10 $\mu\text{m}$
Rawatan hidrogen	Tiada tetapi diperlukan untuk tingkatan kepekatan
Rawatan UV	Ya
Rawatan haba	Ya
Analisis Kepekatan Asid	Kp = 1000 rpm
	$\Delta n = 0.0003/\text{peratus kepekatan}$
	$\Delta d = 0.0202 \mu\text{m}/\text{peratus kepekatan}$
	Kp = 2000 rpm
	$\Delta n = 0.0003/\text{peratus kepekatan}$
	$\Delta d = 0.0994 \mu\text{m}/\text{peratus kepekatan}$
	Kp = 2500 rpm
	$\Delta n = 0.0002/\text{peratus kepekatan}$
	$\Delta d = 0.0923 \mu\text{m}/\text{peratus kepekatan}$
	Kepekatan asid fosforik 40%
$\Delta n = 5 \times 10^{-6}/\text{rpm}$	
$\Delta d = 0.0035 \mu\text{m}/\text{rpm}$	
Analisis Kadar Putaran	Kepekatan asid fosforik 50%
	$\Delta n = 6 \times 10^{-6}/\text{rpm}$
	$\Delta d = 0.004 \mu\text{m}/\text{rpm}$
	Kepekatan asid fosforik 60%
$\Delta n = 8 \times 10^{-6}/\text{rpm}$	
$\Delta d = 0.0011 \mu\text{m}/\text{rpm}$	
Rawatan/ Ujian Suhu	Kepekatan asid fosforik 40%
	$\Delta n = 2 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$
	Kepekatan asid fosforik 50%
	$\Delta n = 4 \times 10^{-9}/^\circ\text{C}$
Kepekatan asid fosforik 60%	
$\Delta n = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	
Ujian UV	$\Delta n = 1 \times 10^{-4}$
Ujian UV (Selepas rawatan haba)	$\Delta n = 1 \times 10^{-3}$
Tempoh Rawatan UV	30 minit
Fotopeka	Baik
Habapeka	Baik

sebanyak  $1 \times 10^{-4}$ . Nilai ini adalah kecil kerana sinaran UV sebenar yang perlu digunakan dalam penulisan jeriji mempunyai panjang gelombang 244 nm dari sumber laser eksimer KrF. Walaupun nilai perubahan ini kecil tetapi nilai  $\Delta n$  ini sesuai dijadikan sebagai nilai modulasi indeks dalam rekabentuk penulisan jeriji Bragg. Secara teorinya, nilai perubahan indeks biasan yang berlaku ke atas gentian silika yang didopkan dengan atom fosforus ialah sekitar  $7 \times 10^{-4}$  dan nilai ini menghampiri dengan

nilai yang diperolehi semasa eksperimen ini dijalankan iaitu ( $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$ ). Selain dari itu, ujian dan rawatan UV juga dilakukan ke atas sampel-sampel yang telah selesai dari ujian haba pada suhu  $400^\circ\text{C}$ . Hasil yang diperolehi adalah mengagumkan kerana perubahan indeks biasan yang berlaku meningkat setinggi  $1 \times 10^{-3}$ . Di sini dapat disimpulkan bahawa nilai perubahan indeks biasan akan meningkat dengan gandaan 10 setelah sampel-sampel tersebut dirawat dengan rawatan haba. Dalam eksperimen



ini tempoh rawatan UV yang dijalankan adalah selama 30 min pertama sebelum ujian UV dilakukan. Kesimpulannya daripada ujian UV yang telah dilakukan, lapisan silika terdop fosforus dan kodop boron yang dibangunkan menggunakan kaedah Penyalutan mejam ini merupakan lapisan fotopeka.

Setelah proses pencirian yang dilakukan ke atas sampel-sampel BPSG yang berkod D1 hingga F5, didapati julat indeks biasan lapisan BPSG ialah dari 1.5141 hingga 1.544 dan ketebalan lapisan yang terbentuk ialah dari 2.7 mm hingga 10 mm yang mana nilai ini bergantung kepada kadar putaran dan juga kepekatan asid fosforik yang digunakan. Lebih tinggi nilai kepekatan asid fosforik lebih tinggi nilai indeks biasan dan ketebalan lapisan yang terbentuk. Begitu juga dengan kadar putaran, nilai indeks biasan dan juga ketebalan akan meningkat dengan peningkatan nilai kadar putaran.

Daripada ujian rawatan haba yang telah dilakukan ke atas tiga sampel lapisan silika terdop fosforus dan kodop boron yang dibangunkan menggunakan teknik penyalutan mejam dan kaedah campuran terus sebatian kimia, menunjukkan lapisan yang terhasil merupakan lapisan silika dan bukannya polimer. Ini adalah kerana keutuhan lapisan yang terbentuk setelah suhu persekitaran ditingkatkan sehingga 400°C yang mana kebanyakan polimer akan mengalami proses penurunan apabila suhu setinggi ini dikenakan.

Selain itu, lapisan silika terdop fosforus dan kodop boron juga merupakan bahan yang stabil kerana perubahan atau peningkatan pada suhu persekitaran hanya mengubah sedikit sahaja ciri-ciri fizikal lapisan tersebut (ketebalan dan indeks biasan). Oleh itu, disimpulkan bahawa selain daripada bersifat fotopeka, lapisan silika terdop fosforus dan kodop boron ini juga bersifat habapeka dan juga stabil terhadap perubahan persekitaran luaran. Oleh itu ianya sesuai sekali dijadikan elemen dalam peranti penuras jeriji Bragg dan juga kegunaan penderia-penderia.

#### RUJUKAN

- Bennion, I., Williams, J.A.R., Zhang, L., Sugden, K. & Doran, N.J. 1996. UV-written in fibre Bragg gratings. *Optical Quantum Electron* 28: 93-135.
- Bilodeau, F., Johnson, D.C., Malo, B., Vineberg, K.A., Hill, K.O., Morse, T.F., Kilian, A. & Reinhart, L. 1990. Ultraviolet-light photosensitivity in Er<sup>3+</sup>-Ge-doped optical fiber. *Optics Letters* 15(20): 1138-1140.
- Bilodeau, F., Malo, B., Albert, J., Johnson, D.C., Hill, K.O., Hibino, Y., Abe, M. & Kawachi, M. 1993. Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon/silica waveguides. *Optics Letters* 18(12): 953-955.
- Butler, T.M., Igata, E., Sheard, S.J. & Blackie, N. 1999. Integrated optical Bragg-grating-based chemical sensor on a curved input edge waveguide structure. *Optical Letter* 24(8): 525-527.
- Hand, D.P. & Russell, P.St.J. 1990. Photoinduced refractive-index changes in germanosilicate fibers. *Optics Letter* 15(2): 102-104.
- Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C. & Kawasaki, B.S. 1978. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letter* 32(10): 647-649.
- Hill, K.O., Malo, B., Bilodeau, F., Johnson, D.C., Morse, T.F., Kilian, A., Reinhart, L. & Oh, K. 1991. Photosensitivity in Eu<sup>2+</sup>:Al<sup>2</sup>O<sup>3</sup>-Doped-Core Fiber: Preliminary Results and Application to Mode Converters. *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* 14: 14-17.
- Lemaire, P.J., Atkins, R.M., Mizrahi, V. & Reed, W.A. 1993. High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres. *Electronics Letter* 29(13): 1191-1193.
- Lemaire, P.J., Vengsarkar, A.M., Reed, W.A. & DiGiovanni, D.J. 1995. Thermally enhanced ultraviolet photosensitivity in GeO<sub>2</sub> and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> doped optical fibers. *Applied Physics Letter* 66: 2034-2036.
- Malo, B., Albert, J., Bilodeau, F., Kitagawa, T., Johnson, D.C., Hill, K.O., Hattori, K., Hibino, Y. & Gujrathi, S. 1994. Photosensitivity in phosphorus-doped silica glass and optical waveguides. *Applied Physics Letter* 65(4): 394-396.
- Murphy, T.E., Ferrera, J., Hastings, J.T., Khan, M.J., Koontz, E.M., Lim, M.H., Haus, H., Kolodziejcki, L.A. & Smith, H.I. 2000. Development of fabrication techniques for building integrated optical grating-based filters. *Annual report 2000*. NanoStructure Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. <http://nanoweb.mit.edu/annual-report00/16.html>.
- Niay, P., Bernage, P., Taunay, T., Xie, W.X., Boj, S., Delevaque, E., Poignant, H. & Monerie, M. 1994. Fabrication of Bragg gratings in fluorozirconate fibers and application to fiber lasers. *Conference on Laser and Electro-Optics*, Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC), 8, Paper CPD 91/21.
- Othonos, A. & Kalli, K. 1999. *Fiber Bragg Gratings, Fundamental and Applications in Telecommunications and Sensing*. Boston: Artech House.
- Poumellec, B., Niayz, P., Douayz, M. & Bayon, J.F. 1996. The UV-induced refractive index grating in Ge:SiO<sub>2</sub> preforms: additional CW experiments and the macroscopic origin of the change in index. *Journal of Physics D: Applied Physics* 29: 1842-1856.
- Stone, J. 1987. Photorefractivity in GeO<sub>2</sub>-doped silica fibers. *Journal of Applied Physics*. 62: 4371-4374.
- Williams, D.L., Ainslie, B.J., Armitage, J.R., Kashyap, R. & Campbell, R. 1993a. Enhance UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibers. *Electronics Letters* 29: 45-47.
- Williams, D.L., Ainslie, B.J., Kashyap, J.R., Maxwell, G.D., Armitage, J.R., Campbell, R.J. & Wyatt, R.R. 1993b. Photosensitive index changes in germania doped silica fibres and waveguide, Photosensitivity and self-organization in optical fibers and waveguides. *Proceedings of SPIE* 2044: 55-68.
- Williams, G.M., Tsung-Ein, T., Merzbacher, C.I. & Friebele, E.J. 1997. Photosensitivity of rare-earth-doped ZBLAN fluoride glasses. *IEEE Journal of Lightwave Technology* 15(8): 1357-1362.
- Worhoff, K., Lambeck, P.V. & Driessen, A. 1999. Design, Tolerance Analysis, and Fabrication of Silicon Oxynitride Based Planar Optical Waveguides for Communications Devices. *IEEE Journal of Lightwave Technology* 17(8): 1401-1407.

Spectrum Technology Research Group  
Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor D.E.  
Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: syuhaimi@eng.ukm.  
my

Diserahkan: 14 Disember 2010

Diterima: 16 Mei 2011