Phương pháp chặn mốt bậc cao trong sợi quang có cấu trúc micro sử dụng trong công nghệ FTTH

Suppression Method of Cladding Modes in Micro-Structured Fiber Using for FTTH Technology

Vũ Ngọc Hải, Vũ Doãn Miên, Trần Quốc Tiến, Hwang In-Kag

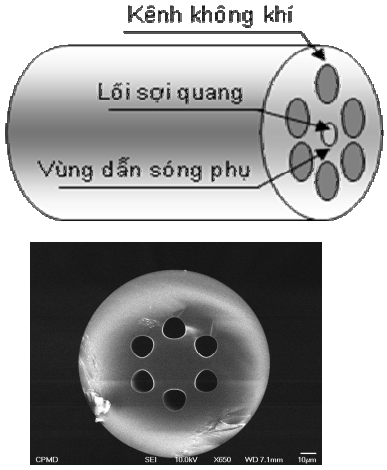
Abstract: *We propose and demonstrate bend-insensitive fibers equipped with higher-order mode strippers. The mode stripper is realized by filling a section of air holes with epoxy to attenuate any higher-order modes that are excited at fiber junctions and are confined by the air holes surrounding the core. We found that the higher-order modes are well suppressed with 5,5 cm-long epoxy columns. An ultralow bending loss of 0.025 dB/turn at a bend diameter of 10 mm, together with single-modeness, is experimentally demonstrated in a bend-insensitive fiber diameter.*

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhưng năm gần đây, các ứng dụng công nghệ cáp quang đến từng hộ gia đình (FTTH: Fiber-To-The-Home) đang phát triển một cách nhanh chóng do sự gia tăng bùng nổ của các thuê bao internet tốc độ cao trên toàn cầu. Khi sử dụng sợi quang đơn mốt (SMFs) thông thường cho các ứng dụng FTTH, cáp quang phải được lắp đặt một cách rất cẩn thận để tránh bị gấp khúc hoặc uốn cong với bán kính quá nhỏ trên toàn tuyến do hiện tượng suy hao do uốn cong (bending loss) hay là sự mất mát tín hiệu khi sợi quang bị uốn cong [1]. Đối với các sợi quang thông thường, bán kính cong cho phép không nhỏ hơn 30 mm, sự giới hạn này làm tăng giá thành và lãng phí không gian khi thiết lập đường truyền FTTH. Có một số phương pháp đã được đưa ra nhằm giảm bán kính cong của sợi quang đơn mốt như là: giảm chiết xuất vùng vỏ sợi quang, sợi quang có rãnh chiết xuất thấp [2-4], sợi quang có cấu trúc micro hoặc nano [5-7]. Hiện nay, sợi quang có suy hao do uốn cong cực thấp (<10 dB/km với đường kính cong 10 mm) đã được chính các tác giả thiết kế và chế tạo tại công ty OptoMagic Co. Ltd. trên cơ sở sợi quang có cấu trúc micro, hiện nay trên thế giới các loại sợi quang này được đặt tên chung là sợi quang không nhạy với sự uốn cong (BIF: Bend Insensitive Fiber [6]).

(a)

(b)

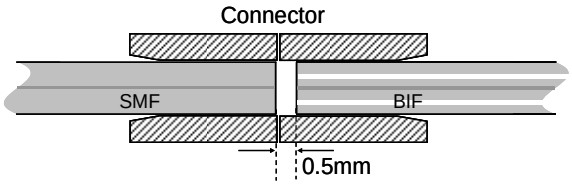


Hình 1. BIF với 6 lỗ không khí chạy dọc theo lõi sợi và chụp mặt cắt trên kính hiển vi điện tử quét (lõi sợi quang không hiển thị được trên kính hiển vi điển tử so sự chệnh lệch chiết suất lõi sợi và lớp vỏ là quá nhỏ)

Hình 1 mô tả cấu trúc của một BIF và ảnh chụp mặt cắt trên kính hiển vi điện tử quét. Điểm khác biệt của sợi quang này so với sợi quang đơn mốt thông thường đó là lớp các ống không khí bao gồm 6 kênh có đường kính 16 μm chạy dọc theo lõi sợi quang. Lớp các kênh không khí này tạo thành một vùng có

chiết xuất trung bình thấp hơn chiết xuất silica tại vỏ và hình thành nên một hàng rào ngăn cản hiện tượng dò tín hiệu tại vùng sợi quang bị uốn cong.

Với cấu trúc này vùng vỏ sợi nằm giữa lõi và các kênh không khí sẽ tạo thành một vùng dẫn sóng phụ. Dưới điều kiện bình thường chỉ có một mốt được truyền trong lõi sợi quang giống như sợi đơn mốt thông thường. Tuy nhiên tại các điểm ghép nối, tín hiệu ánh sáng thường bị tán xạ và một phần bị dò ra khỏi lõi sợi quang. Phần tín hiệu bị dò này sẽ bị giam giữ và truyền đi trong vùng dẫn sóng phụ hình thành nên các mốt bậc cao [8]. Các mốt bậc cao này là nguyên nhân gây hiện tượng giao thoa mốt và làm công suất tín hiệu đầu ra không ổn định. Công suất các mốt bậc cao trong vùng dẫn sóng phụ càng lớn thì sự dao động của công suất đầu ra càng lớn. Để minh chứng cho điều này, chúng tôi tiến hành đo đạc độ thăng giáng của tín hiệu đầu ra phụ thuộc vào chất lượng ghép nối bằng cách thay đổi khoảng cách ghép nối tại đầu nối. Bảng một mô tả sự phụ thuộc của biên độ thăng giáng của công suất tại đầu ra vào chất lượng tại các điểm ghép nối. Chúng ta có thể thấy rằng sự mất mát tín hiệu tại vùng ghép nối bằng bộ nối (connector) quang càng lớn thì sự giao thoa càng lớn, hay công suất của mốt vỏ càng lớn. Hình 2 mô tả thí nghiệm kiểm tra độ bất ổn định của tín hiệu phụ thuộc vào khoảng cách giữa 2 đầu sợi quang tại đầu nối [9].



Hình 2. Mặt cắt tại điểm ghép nối giữa SMF và BIF sử dụng đầu nối, khoảng cách giữa 2 sợi quang là có thể thay đổi được để khảo sát quá trình kích thích mốt bậc cao

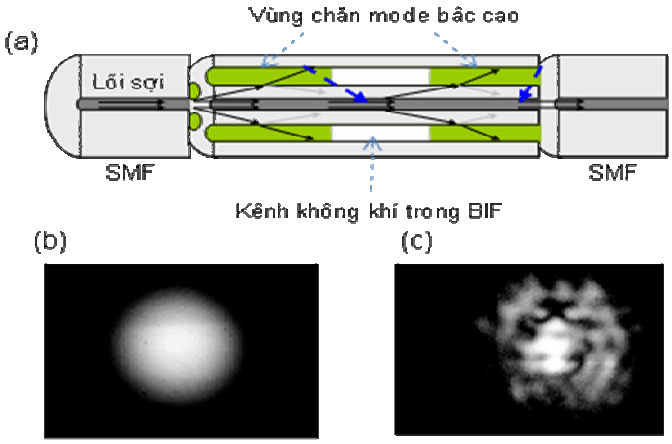
Một phương pháp đơn giản để tránh hiện tượng nhiễu tín hiệu do mốt bậc cao gây ra đó là tạo ra các vùng chặn mốt bậc cao tại hai đầu sợi quang. Trong nghiên cứu này chúng tôi đề xuất một phương pháp hiệu quả và đơn giản nhất đó là bơm epoxy vào các kênh không khí tại hai đầu sợi quang (BIF). Nguyên lý chặn mốt bậc cao và phương pháp chế tạo sẽ được trình bày trong phần tiếp theo.

Bảng 1. Biên độ thăng giáng công suất đầu ra phụ thuộc vào khoảng cách giữa 2 đầu sợi quang tại điểm ghép nối sử dụng đầu nối quang.

Khoảng cách giữa các sợi quang (mm)	0,3	0,5	0,7
Sự thăng giáng công suất quang (%)	10,3	18,9	29,2

II. QUÁ TRÌNH CHẶN MỐT BẬC CAO

Như đã trình bày ở trên, các mốt bậc cao sẽ được kích thích do việc hàn sợi quang hoặc ghép nối và các mốt này sẽ bị giam giữ và truyền đi trong vùng dẫn sóng phụ. Khi ta bơm epoxy vào các kênh không khí ở đầu sợi quang, do chiết suất của epoxy lớn hơn của Silica ($n_{epoxy}>n_{silica}$) nên các mốt bậc cao này sẽ không bị giam giữ bởi hiện tượng phản xạ toàn phần tại vùng dẫn sóng phụ nữa. Thay vào đó, chỉ một phần rất nhỏ được truyền đi do hiện tượng phản xạ Fresnel tại bề mặt epoxy/silica [10].



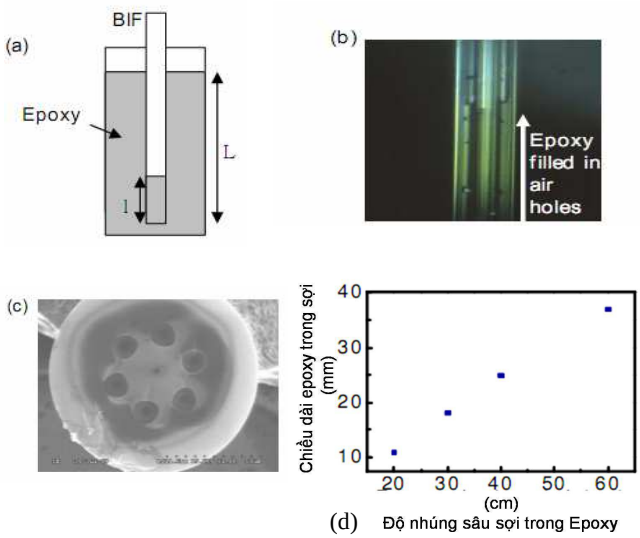
Hình 3. (a) Cơ chế chặn mốt bậc cao bằng phương pháp bơm epoxy ở hai đầu sợi quang. (b), (c) chỉ ra phân bố trường xa tại đầu ra trong hai trường hợp có và không có vùng chặn mốt bậc cao

Hình 3 mô tả cơ chế hoạt động của vùng chặn mốt bậc cao. Nếu chiều dài của cột epoxy trong sợi quang đủ lớn, thì toàn bộ mốt bậc cao sẽ bị chặn và chỉ duy nhất một mốt trong lõi sợi được truyền đi.

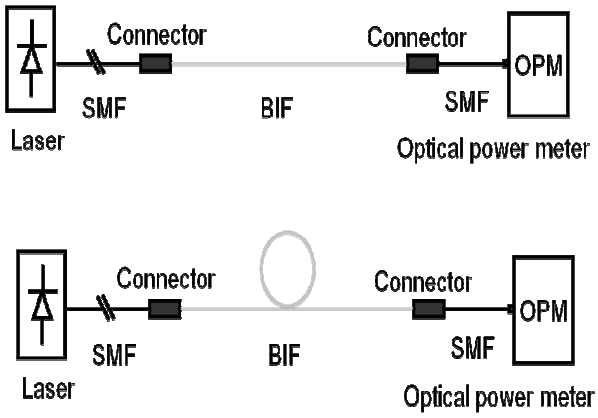
Hình 3(b) và 3(c) chỉ ra phân bố trường xa tại đầu ra của sợi quang trong trường hợp có và không có epoxy. Phân bố trường xa là phân bố của cường độ ánh sáng ra tại đầu sợi quang. Sự phân bố đối xứng tròn đều trong Hình 2(b) chỉ rõ rằng đây là phân bố trường xa của mốt cơ bản trong lõi, hoàn toàn không có mốt bậc cao. Trong khi đó sự phức tạp trong Hình 3(b) là sự trộn lẫn của mốt bậc cao và mốt cơ bản. Chúng tôi cũng tiến hành khảo sát sự thăng giáng công suất tại đầu ra tín hiệu và thấy rằng tín hiệu hoàn toàn ổn định không có sự thăng giáng công suất, điều này khẳng định thêm một lần nữa rằng tín hiệu truyền trong sợi quang là hoàn toàn đơn mốt.

Có nhiều phương pháp để đưa epoxy vào trong kênh không khí trong sợi quang sử dụng các máy bơm microlitter. Tuy nhiên các phương pháp này phức tạp và khó ứng dụng trong việc chế tạo hàng loạt trong sản xuất. Trong nghiên cứu này chúng tôi đề xuất một phương pháp đơn giản đó là nhúng sợi quang sâu vào trong ống chứa epoxy. Epoxy sẽ được đưa vào trong sợi quang nhờ áp lực của cột chất lỏng epoxy và hiện tượng mao dẫn. Bởi vì sức căng bề mặt của epoxy là khá cao và kích thước các kênh không khí có kích thước Micro nên để đạt được chiều dài vài cm epoxy trong sợi quang chúng ta phải nhúng sâu sợi quang trong epoxy khoảng vài chục cm.

Trong nghiên cứu này chúng tôi sử dụng loại epoxy NOA 60 đóng rắn bằng tia cực tím với chiết suất phù hợp 1,56 và có độ nhớt thấp (300 CPS). Hình 4(a) mô tả quá trình đưa epoxy vào kênh không khí và Hình 4(c) mô tả mặt cắt với 6 kênh không khí được điền đầy epoxy. Việc xác định chiều dài epoxy ở trong sợi quang được thực hiện bằng kính hiển vi quang học như trong Hình 4(b). Sự phụ thuộc của chiều dài epoxy trong sợi quang vào độ nhúng sâu trong ống epoxy được thể hiện trong Hình 4(d).



Hình 4. Phương pháp tạo vùng chặn mốt bậc cao: nhúng sâu sợi quang vào trong epoxy (a); sợi quang có epoxy ở đầu nhìn từ mặt bên (b); ảnh SEM tại mặt cắt (c); Sự phụ thuộc của epoxy trong sợi vào độ nhúng sâu (d)



Hình 5. Thí nghiệm đo đạc công suất mốt bậc cao: hình trên là sợi quang BIF thẳng, hình dưới là sợi quang được uốn cong một vòng với bán kính 5 mm

Chúng ta dễ dàng thấy rằng, lượng epoxy trong sợi quang càng dài thì hiệu ứng chặn mốt bậc cao càng tốt. Tuy nhiên, bởi vì vùng epoxy trong sợi quang là vùng gia cố đặc biệt nên chúng ta phải tối ưu hóa chiều dài sao cho ngắn nhất mà việc chặn mốt bậc cao vẫn đạt hiệu quả tối đa. Trong quá trình tối ưu hóa chiều dài vùng chặn mốt, chúng tôi chọn chế độ ghép nối sợi quang sao cho mốt bậc cao được kích thích tối

đa. Điều này sẽ đảm bảo mốt bậc cao sẽ được loại bỏ hoàn toàn trong mọi điều kiện thực tế.

Để tìm chiều dài tối thiểu của vùng chặn mốt, cách đơn giản nhất là chúng ta thay đổi chiều dài của epoxy trong sợi quang và quan sát phân bố trường xa ở đầu ra. Khi sự phân bố này trở nên tròn và đối xứng đều tương ứng với việc toàn bộ mốt bậc cao đã bị loại bỏ. Tuy nhiên đây chỉ là một phương pháp xác định định tính. Trong nghiên cứu này lần đầu tiên chúng tôi đưa ra một phương pháp định lượng mới để tính toán tỉ lệ công suất mốt bậc cao/công suất mốt cơ bản. Sử dụng phương pháp này chúng ta có thể tìm được chiều dài tối ưu cho vùng chặn mốt bậc cao. Hình 5 mô tả sơ đồ thí nghiệm cho việc tính toán công suất mốt bậc cao. Đầu tiên, ánh sáng có bước sóng 1,55 µm (bước sóng chuẩn trong công nghệ thông tin cáp quang) được đưa vào 1 sợi quang BIF thẳng thông qua 1 sợi đơn mốt SMF. Tại đầu ra đặt 1 máy đo công suất quang để xác định công suất ra P_{out}. Đây là tổng công suất của mốt bậc cao P_{clad} và mốt cơ bản P_{core}:

$$P_{out} = P_{clad} + P_{core} \quad (1)$$

Sau đó, quấn sợi quang thành 1 vòng rất với bán kính cong tương đối nhỏ (R< 6mm) và tiếp đo công suất ra P'_{out}, ta có:

$$P'_{out} = P_{clad}\,\mathbf{exp}(-\alpha' 2\pi R) + P_{core}\,\mathbf{exp}(-\alpha 2\pi R) \quad (2)$$

Ở đây, α' và α là hệ số mất mát do uốn cong (beding loss factor) của mốt bậc cao và cơ bản tương ứng. Sự mất mát do uốn cong phụ thuộc và hàm exponetial với biến số là bán kính cong (REF). Chúng ta biết rằng α' lớn hơn hàng chục lần so với α nên tại bán kính cong rất nhỏ thì số hạng P_{clad} exp(-α'2π*R*) tiến tới 0. Và biểu thức số 2 trở thành:

$$P'_{out} = P_{core}\,\mathbf{exp}(-\alpha 2\pi R) \quad (3)$$

Hệ số mất mát uốn cong của mốt cơ bản α tại bán kính cong R có thể đo đạc trực tiếp và khá đơn giản bằng cả thực nghiệm và mô phỏng. Chúng ta có thể xem và lấy kết quả trong Hình 8.

Vì thế ta có thể xác định được giá trị P_{core} trong biểu thức (1) là

$$P_{core} = P'_{out}/\mathbf{exp}(-\alpha 2\pi R) \quad (4)$$

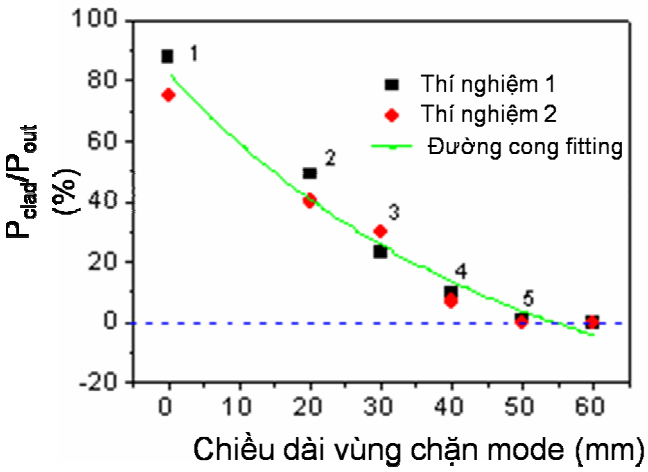
Thay thế giá trị này trở lại biểu thức 1 ta có

$$P_{out} = P_{clad} + P'_{out}/\mathbf{exp}(-\alpha 2\pi R) \quad (5)$$

Từ đó tính được

$$P_{clad} = P_{out} - P'_{out}/\mathbf{exp}(-\alpha 2\pi R) \quad (6)$$

Như vậy, ta có thể tính toán được công suất của mốt bậc cao trong sợi quang BIF một các chính xác.

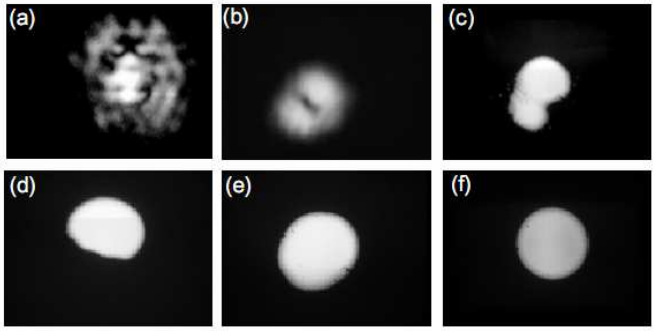


Hình 6. Tỉ lệ công suất mốt bậc cao/công suất toàn phần phụ thuộc vào chiều dài vùng chặn mốt l

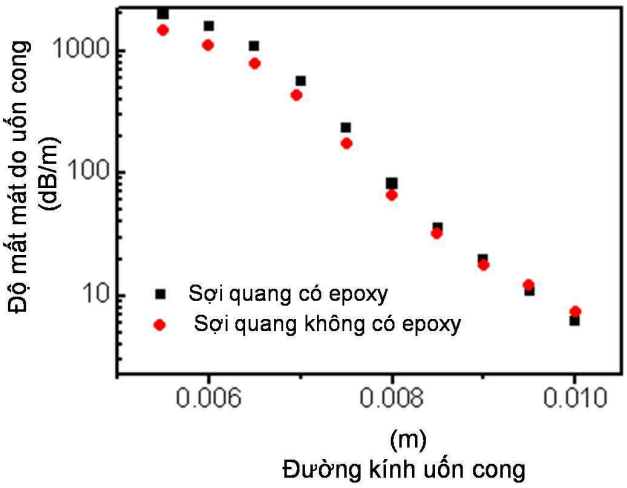
Chúng tôi tính toán công suất mốt bậc cao với các chiều dài vùng chặn mốt *l* thay đổi từ 0, 20, 30, 40, 50 cm và vẽ sự phụ thuộc của P_{cald} vào *l* (Hình 6). Chúng ta có thể thấy rằng khi vùng chặn mốt đạt chiều dài trên 5 cm thì toàn bộ mốt bậc cao tiến tới 0. Kiểm tra lại trên phân bố trường xa ta thấy kết quả hoàn toàn chính xác, khi *l*>5cm thì phân bố trường xa trở nên tròn đều đồng nhất (Hình 7).

Để khẳng định lại hiệu ứng chặn mốt bậc cao hoàn toàn không ảnh hưởng tới tính chất mất mát do uốn cong cực thấp của sợi quang BIF, đồ thị sự phụ thuộc của mất mát do uốn cong phụ thuộc vào bán kính cong R được vẽ trong hai trường hợp có và không có vùng

chặn mốt bậc cao. Đường kính cong được thay đổi dần từ 5,5 mm tới 10mm với bước nhảy 0,5 mm. Chúng ta thấy rằng độ mất mát do uốn cong trong cả 2 trường hợp gần như trùng nhau (Hình 8), chứng tỏ rằng vùng chặn mốt bậc cao hoàn toàn không ảnh hưởng tới đặc tính của sợi quang BIF.



Hình 7. Phân bố trường xa phụ thuộc vào chiều dài vùng chặn mốt (a) 0mm; (b) 10m; (c) 20mm; (d) 30mm; (e) 40mm; (f) 50mm



Hình 8. Sự phụ thuộc của mất mát do uốn cong vào bán kính uốn cong trong hai trường hợp có và không có epoxy ở đầu

III. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đưa ra một phương pháp hoàn toàn mới để ngăn chặn các mốt bậc cao trong sợi quang BIF ứng dụng trong công nghệ FTTH. Bằng cách điền đầy epoxy vào các kênh không khí của sợi quang với chiều dài 5 cm thì toàn bộ mốt bậc cao đã bị loại bỏ. Sợi quang BIF trở thành sợi quang hoàn toàn đơn mốt và vẫn đảm bảo được tính chất mất mát do uốn cong cực thấp. Các tác giả cũng đưa ra một phương pháp mới để đưa epoxy vào trong lõi sợi quang và tính toán công suất mốt bậc cao một cách đơn giản và có nhiều khả năng ứng dụng trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] I. SAKABE, H. ISHIKAWA, H. TANJI, Y. TERASAWA, T. UEDA, AND M. ITOU, *"Bend-Insensitive SM Fiber and Its Applications to Access Network Systems,"* IEICE Trans. Electron. E88-C(5), 896–903 (2005).

[2] P. R. WATEKAR, S. JU, AND W. T. HAN, *"Single-mode optical fiber design with wide-band ultra low bending-loss for FTTH application,"* Opt. Express 16(2), 1180–1185 (2008).

[3] J. M. FINI, P. I. BOREL, M. F. YAN, S. RAMACHANDRAN, A. D. YABLON, P. W. WISK, D. TREVOR, D. J. DIGIOVANNI, J. BJERREGAARD, P. KRISTENSEN, K. CARLSON, P. A. WEIMANN, C. J. MARTIN, A. MCCURDY, *"Solid Low-Bend Loss Transmission Fibers using Resonant Suppression of High-Order modes,"* ECOC'08, Brussels, paper Mo.4.B.4 (2008).

[4] L.A. DE MONTMORILLON, F. GOOIJER, N. MONTAIGNE, S. GEERINGS, D. BOIVIN, L. PROVOST, P. SILLARD, *"All-Solid G.652.D Fiber with Ultra Low Bend Losses down to 5 mm Bend Radius,"* OFC'09, San Diego, CA, paper OTuL3 (2009).

[5] D. NISHIOKA, T. HASEGAWA, T. SAITO, E. SASAOKA, AND T. HOSOYA, *"Development of Holey Fiber Supporting Extra Small Diameter Bending,"* SEI Tech. Rev. 58, 42–47 (2004).

[6] Y. BING, K. OHSONO, Y. KUROSAWA, T. KUMAGAI, AND M. TACHIKURA, *"c.* 24, 1–5 (2005).

[7] T. W. WU, L. DONG, AND H. WINFUL, *"Bend performance of leakage channel fibers,"* Opt. Express 16(6), 4278–4285 (2008).

[8] M.J. LI, P. TANDON, D. C. BOOKBINDER, S. R. BICKHAM, M. A. MCDERMOTT, R. B. DESORCIE, D. A. NOLAN, J. J. JOHNSON, K. A. LEWIS, AND J. J. ENGLEBERT, *"Ultra-Low Bending Loss Single-mode Fiber for FTTH,"* J. Lightwave Technol. 27(3), 376–382 (2009).

[9] D. BOIVIN, L.-A. DE MONTMORILLON, L. PROVOST, AND P. SILLARD, *"Coherent Multipath Interference in Bend-Insensitive Fibers,"* IEEE Photon. Technol. Lett. 21(24), 1891–1893 (2009).

[10] J. HSIEH, P. MACH, F. CATTANEO, S. YANG, T. KRUPENKINE, K. BALDWIN, AND J. A. ROGERS, *"Tunable microfluidic optical-fiber devices based on electrowetting pumps and plastic microchannels,"* IEEE Photon. Technol. Lett. 15(1), 81–83 (2003).

Ngày nhận bài: 20/09/2010

SƠ LƯỢC VỀ TÁC GIẢ

VŨ NGỌC HẢI

Sinh năm 1981.

Tốt nghiệp xuất sắc chương trình đào tạo Cử nhân tài năng Đại học Quốc gia Hà Nội năm 2003. Bảo vệ luận án Thạc sỹ ngành vật liệu và linh kiện nano năm 2006. Bảo vệ thành công luận án Tiến sỹ khoa học tự nhiên tại Đại học Quốc gia Chonnam, Hàn Quốc chuyên ngành kỹ thuật sợi quang năm 2009. Làm trong các dự án R&D của Công ty sợi quang Optomagic, Korea đến tháng 3 năm 2010.

Hiện là Viện trưởng Viện nghiên cứu Kỹ thuật công nghệ cao NTT-Trường cao đẳng Nguyễn Tất Thành, Tp. Hồ Chí Minh.

Lĩnh vực nghiên cứu: Thông tin quang sợi, Laser, Vật lý mô phỏng.

HWANG IN-KAG

Sinh năm 1971.

Tốt nghiệp Tiến sỹ tại viện KAIST, Hàn Quốc năm 2003.

Hiện là Phó Giáo sư tại Đại học Quốc gia Chonnam, Hàn Quốc. Sở hữu trên 40 công trình nghiên cứu được đăng trên các tạp chí quốc tế trong lĩnh vực Quang học và laser.

Lĩnh vực nghiên cứu: Kỹ thuật sợi quang, Laser, Bio-physics.

VŨ DOÃN MIÊN

Sinh năm 1949.

Tốt nghiệp Trường Đại học Tổng hợp Quốc gia Belarus năm 1973, tốt nghiệp Tiến sỹ tại Trường Đại học Tổng hợp Matxcơva, Liên Xô cũ năm 1984.

Hiện nay là Phó Giáo sư tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ Việt nam. Là giảng viên kiêm nhiệm của Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: Laser bán dẫn và thông tin quang.

TRẦN QUỐC TIẾN

Sinh năm 1974.

Tốt nghiệp Đại học tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 1996, tốt nghiệp Tiến sỹ tại Trường Đại học Kỹ thuật Berlin, CHLB Đức năm 2007, làm postdoc tại Viện FBH, Berlin từ năm 2007 đến năm 2009.

Hiện nay là Trưởng phòng Laser bán dẫn, Viện Khoa học Vật liệu, Viện Khoa học và Công nghệ Việt nam.

Lĩnh vực nghiên cứu: Laser bán dẫn và quang điện tử.