

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA PARA MONITORIZAÇÃO SIMULTÂNEA DE TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO EM ESTRUTURAS INTELIGENTES E MATERIAIS COMPÓSITOS

O. Frazão^(a), F. M. Araújo^(b, a), L. A. Ferreira^(a), J. L. Santos^(b, a), and F. Farahi^(c)

^(a) INESC PORTO - Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos

^(b) Departamento de Física da Universidade do Porto

^(c) Physics Department, University of North Carolina at Charlotte



RESUMO

Neste artigo é apresentada uma nova configuração sensora baseada em redes de Bragg em fibra óptica para a medição simultânea de temperatura e deformação em estruturas inteligentes e materiais compósitos. A configuração sugerida utiliza o efeito da co-dopagem com boro na dependência do índice de refração na temperatura: ao escrever redes de Bragg com comprimentos de onda de ressonância próximos em fibra óptica com e sem dopagem com boro, obtêm-se diferentes sensibilidades à temperatura mas sensibilidades similares à deformação mecânica. Estas redes podem, assim, ser utilizadas em conjunto de forma a constituir uma cabeça sensora simples e adequada à inserção em diversos materiais.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, foram propostas e demonstradas várias técnicas baseadas em redes de Bragg em fibra óptica para a medição simultânea de temperatura e deformação¹. Em princípio, as cabeças sensoras simples constituídas apenas por redes de Bragg em fibra óptica são as mais atraentes do ponto de vista da inserção em materiais compósitos. De facto, cabeças sensoras baseadas na combinação de redes de Bragg com outros tipos de sensores de fibra óptica (Fabry-Pérot², rede de período longo³, filtro de polarização⁴) envolvem muitas vezes um elevado grau de complexidade, quer no processo de fabricação, quer no desenvolvimento de técnicas de interrogação adequadas. Numa

publicação de Xu *et al.*, foi apresentado um sensor de fibra óptica constituído por duas redes de Bragg sobrepostas e escritas a diferentes comprimentos de onda de forma a proporcionarem sensibilidades distintas à temperatura⁵. No entanto, uma vez que o coeficiente termo-óptico tem uma dependência muito reduzida no comprimento de onda, torna-se necessária uma grande separação entre os comprimentos de onda para se obter uma discriminação efectiva entre os efeitos da temperatura e da deformação. Mais tarde, seria sugerida por James *et al.* uma configuração alternativa baseada em redes de Bragg com comprimentos de onda de ressonância próximos mas escritas em fibras ópticas com diâmetros diferentes⁶. Neste caso, são obtidos coeficientes diferentes de deformação para os dois

sensores unidos por fusão quando o conjunto é submetido a tensão mecânica axial. No entanto, quando tal cabeça sensora é inserida numa estrutura, o seu módulo de Young é essencialmente determinado pelo material circundante, o que significa que as sensibilidades de ambos os sensores à deformação se tornam praticamente iguais. Além disso, a união por fusão de duas fibras diferentes origina elevadas perdas de inserção e uma redução significativa da resistência mecânica da cabeça sensora. Uma outra configuração sensora explora a diferente dependência na temperatura dos comprimentos de onda de Bragg associados aos dois picos de reflexão que são obtidos quando uma rede de Bragg é escrita em fibra óptica de alta birrefringência do tipo "PANDA" ou "bow-tie"^{7,8}. Estes sensores têm, de facto, características apropriadas à integração em materiais compósitos, mas a complexidade dos sistemas necessários para os interrogar pode limitar a sua aplicação prática.

Uma alternativa muitas vezes apontada como solução para o problema da medição simultânea de temperatura e deformação consiste em utilizar um sensor de Bragg simultaneamente sensível a estas duas grandezas, em conjunto com um segundo sensor imune à deformação, ou seja, desacoplado da estrutura e que funciona como referência à temperatura^{9,10}. No entanto, para implementar esta técnica é necessário proteger mecanicamente e de forma adequada o sensor de referência, o que pode dificultar o processo de inserção da cabeça sensora nos materiais compósitos.

Neste artigo, é apresentada uma nova configuração sensora adequada à medição simultânea de temperatura e deformação em estruturas inteligentes e materiais compósitos. A cabeça sensora possui duas redes de Bragg escritas em duas secções de fibra de sílica dopada com germânio. Estas fibras têm geometria idêntica, mas uma delas é co-dopada com boro. Deste modo, juntando os dois sensores através de uma união por fusão das fibras, pode construir-se uma cabeça sensora com dimensões reduzidas, constituída por duas redes de

Bragg com respostas análogas à deformação mas com respostas distintas à temperatura.

TEORIA

Na Fig.1 é possível observar em detalhe a configuração proposta para a cabeça sensora.

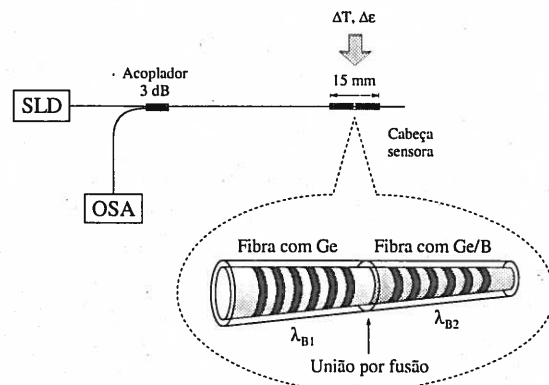


Fig.1 - Montagem experimental e esquema da cabeça sensora proposta (SLD: diodo superluminescente; OSA: analisador de espectros ópticos).

As variações de temperatura (ΔT) e deformação ($\Delta \epsilon$) aplicadas às redes sensoras originam alterações nos comprimentos de onda de Bragg ($\Delta \lambda_B$) dadas por

$$\Delta \lambda_{Bi} = K_{Ti} \Delta T + K_{\epsilon i} \Delta \epsilon, \quad (1)$$

onde $i=1,2$ representam as redes de Bragg escritas em fibra de sílica dopada com germânio e fibra de sílica dopada com germânio e boro, respectivamente. A sensibilidade térmica, K_{Ti} , depende essencialmente do coeficiente termo-óptico da fibra, embora dependa também em menor proporção do coeficiente de expansão térmica. Por outro lado, $K_{\epsilon i}$ depende do coeficiente elasto-óptico da fibra, mas é essencialmente determinado pela variação do período físico da rede de Bragg com a aplicação de deformação que, por sua vez, depende das propriedades mecânicas da fibra. É sabido que a presença de boro no núcleo das fibras ópticas origina não só uma diminuição do índice de refração mas também um decréscimo no valor do coeficiente termo-

óptico¹¹⁻¹³. Assim sendo, é de esperar que a dependência do comprimento de onda de Bragg na temperatura possa ser alterada pela co-dopagem com boro de fibras de sílica e germânio. Atendendo ao facto da co-dopagem com boro não ter qualquer efeito observável nas propriedades mecânicas da fibra, pode então concluir-se que nestas fibras se tem, em geral, $K_{T1} \neq K_{T2}$ e $K_{\epsilon1} = K_{\epsilon2}$. Nesse caso, o conjunto de equações (1) pode ser utilizado para discriminar os efeitos da temperatura e da deformação aplicada à cabeça sensora:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} K_{\epsilon2} & -K_{\epsilon1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

onde $\Delta = K_{T1}K_{\epsilon2} - K_{\epsilon1}K_{T2}$. Resulta desta expressão que a eficiência do método depende da diferença entre K_{T1} e K_{T2} , a qual está directamente relacionada com a concentração de boro na fibra co-dopada.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As redes de Bragg utilizadas nestas experiências foram escritas nas seguintes fibras: Siecor SMF1528, com núcleo simples de sílica e germânio (6 mol% de GeO_2), hidrogenizada a 100 atm à temperatura ambiente; Fibrecore PS1500, com núcleo de sílica dopada com germânio e boro (10 mol% de GeO_2 e 14-18 mol% de B_2O_3). Para simplificar a interrogação da cabeça sensora e facilitar a demonstração experimental do conceito em questão, utilizaram-se máscaras de fase bastante diferentes no processo de escrita das redes de Bragg, que originaram picos de reflexão em $\lambda_{B1} \approx 1300$ nm e $\lambda_{B2} \approx 1280$ nm com reflectividades superiores a 95%. Estas redes foram depois alvo de tratamento térmico e aproximadas o mais possível através da união por fusão das fibras, o que permitiu obter uma cabeça sensora de dimensões muito reduzidas (diâmetro igual ao de uma fibra óptica e comprimento total inferior a 15 mm). Uma vez que a geometria e a abertura numérica das duas fibras são idênticas, foi possível obter também perdas

muito reduzidas na região da união por fusão (perdas de inserção inferiores a 0.02 dB). A cabeça sensora construída foi depois inserida no interior de uma resistência de potência com o auxílio de massa térmica e presa em ambas as extremidades tal como é indicado na Fig.2. Deste modo, foi possível aplicar à cabeça sensora tensão mecânica axial e variar simultaneamente e de forma controlada a temperatura. Para iluminar o sistema sensor foi utilizado um díodo superluminescente ($\lambda_0 = 1280$ nm) e para medir as variações de comprimento de onda de Bragg recorreu-se a um analisador de espectros ópticos (ver Fig.1).

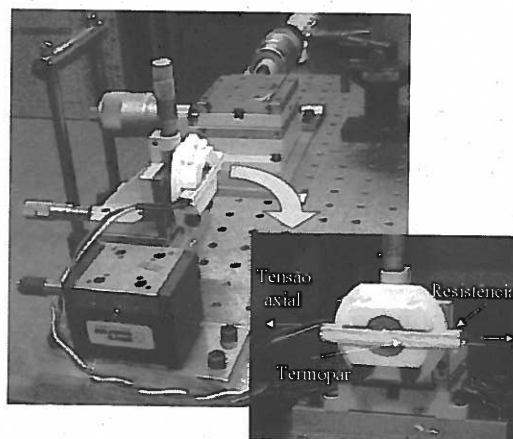


Fig.2 – Montagem laboratorial para aplicação simultânea de temperatura e deformação à cabeça sensora.

As Figs.3 e 4 mostram as respostas das duas redes de Bragg sensoras à aplicação de temperatura e deformação, respectivamente. Tal como foi previsto, obtiveram-se sensibilidades diferentes à temperatura mas as sensibilidades observadas para a deformação são semelhantes. A este respeito, convém não esquecer que a pequena diferença obtida entre os coeficientes $K_{\epsilon1}$ e $K_{\epsilon2}$ resulta apenas de diferentes comprimentos de onda de operação e não está relacionada com quaisquer características materiais das fibras ópticas.

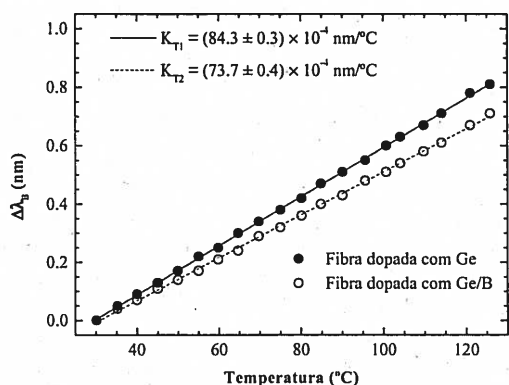


Fig.3 - Resposta do sensor à temperatura.

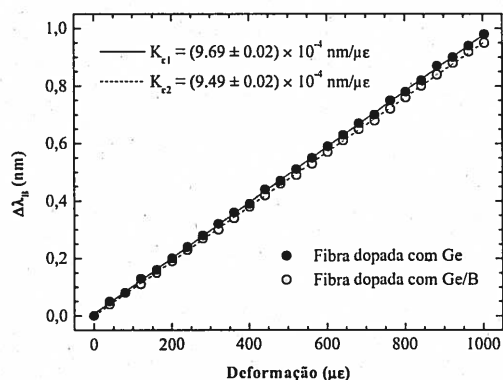


Fig.4 - Resposta do sensor à deformação.

A substituição dos coeficientes obtidos a partir das Figs.3 e 4 na equação (2) permite então escrever:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = 116.5 \begin{bmatrix} 9.49 & -9.69 \\ -73.7 & 84.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B1} \\ \Delta \lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para avaliar a resolução do sistema na situação em que a cabeça sensora é simultaneamente submetida a alterações da temperatura e deformação, efectuou-se a seguinte experiência: para $\varepsilon=500 \mu\epsilon$, variou-se a temperatura numa gama de $\sim 100^\circ\text{C}$. Os valores resultantes de $\Delta\lambda_{B1}$ e $\Delta\lambda_{B2}$ foram depois introduzidos na equação (3) para obter a saída do sistema sensor. Um procedimento análogo foi também adoptado quando se manteve $T=75^\circ\text{C}$ enquanto se variou ε numa gama de $\sim 1 \text{ m}\epsilon$. Os resultados obtidos encontram-se na Fig.5. A partir desta figura é possível estimar erros experimentais máximos de $\pm 1.55^\circ\text{C}$ e $\pm 13.4 \mu\epsilon$ na determinação da temperatura e da deformação, respectivamente. Estes valores foram essencialmente determinados pela

resolução do analisador de espectros ópticos utilizado. Em princípio, melhores resoluções poderão ser obtidas se for utilizada uma técnica mais sensível na interrogação das redes de Bragg como, por exemplo, a interrogação interferométrica¹⁴. Neste contexto, convém referir que a cabeça sensora proposta se adapta facilmente a qualquer um dos esquemas de interrogação normalmente utilizados em sistemas sensores com redes de Bragg. De qualquer forma, a eficiência do método proposto poderá ser sempre melhorada se forem utilizadas redes de Bragg escritas em fibras ópticas com níveis mais elevados de co-dopagem com boro ou redes de Bragg escritas em fibras ópticas com outros co-dopantes.

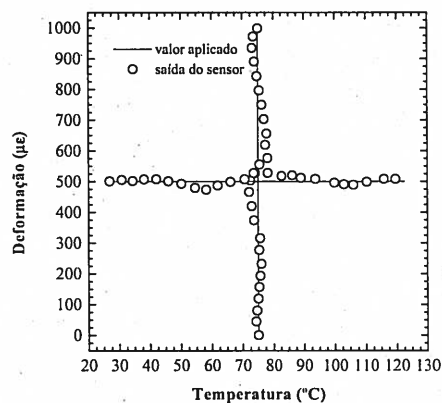


Fig.5 - Respostas do sistema sensor à deformação (com ΔT constante) e à temperatura (com $\Delta \varepsilon$ constante) determinadas a partir da equação (3).

O desempenho do sistema sensor numa situação mais próxima de uma aplicação prática está ilustrado nas Figs.6, 7 e 8. Na Fig.6 pode observar-se as alterações provocadas nos comprimentos de onda de Bragg quando degraus de tensão mecânica axial foram aplicados à cabeça sensora, enquanto a temperatura mudava de forma contínua. Estes dados foram depois utilizados na equação (3) para discriminar os níveis instantâneos de temperatura e deformação. Os resultados obtidos, ilustrados nas Figs.7 e 8, demonstram uma excelente concordância entre os valores aplicados e os valores medidos, tornando evidente a capacidade do sistema sensor para recuperar de forma simultânea informação acerca da temperatura e da

deformação quando estas grandezas variam lentamente no tempo.

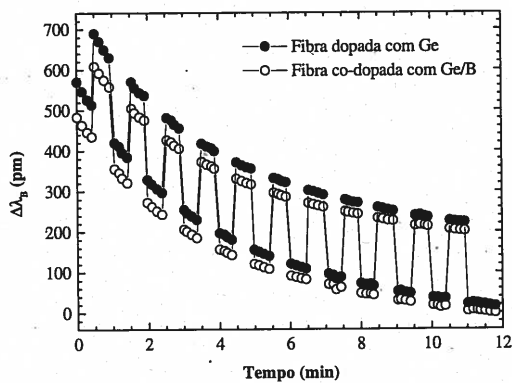


Fig.6 - Resposta do sistema sensor à aplicação simultânea de temperatura e deformação: variação dos comprimentos de onda de Bragg.

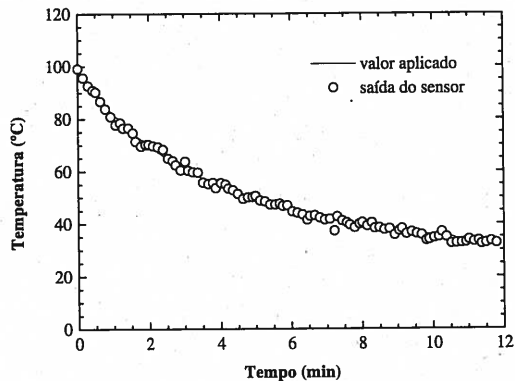


Fig.7 - Resposta do sistema sensor à aplicação simultânea de temperatura e deformação: valores de temperatura determinados a partir da equação (3).

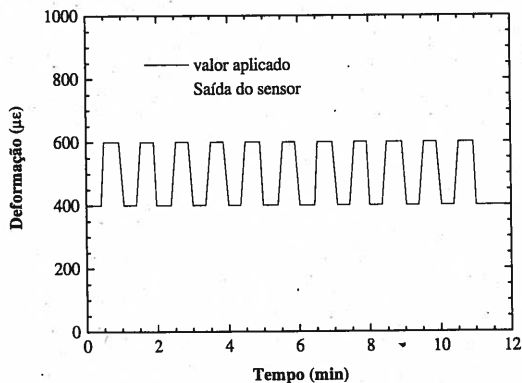


Fig.8 - Resposta do sistema sensor à aplicação simultânea de temperatura e deformação: valores de deformação determinados a partir da equação (3).

Convém salientar que a gama de medição do esquema sensor proposto poderá ser limitada apenas por problemas de sensibilidade cruzada¹⁵, uma vez que a união por fusão das duas fibras que contêm as redes de Bragg não compromete a

rigidez mecânica da cabeça sensora¹⁶. Por outro lado, a baixa perda de potência óptica associada aquela união, bem como a codificação em comprimento de onda dos sinais provenientes das redes de difração de Bragg, tornam esta cabeça sensora particularmente atraente para utilização em redes de sensores multiplexados. Refira-se ainda que o tamanho reduzido, a robustez e a baixa complexidade em termos de fabricação da cabeça sensora são características muito relevantes no contexto da sua integração em materiais compósitos. Deste ponto de vista, é particularmente importante notar que a discriminação entre os efeitos da temperatura e da deformação se baseia exclusivamente na diferença entre as sensibilidades térmicas das redes de Bragg sensoras. Quer isto dizer que poderão ser utilizados revestimentos adequados às diversas aplicações sem que seja comprometido o desempenho do sistema sensor.

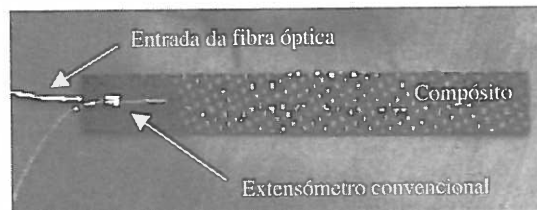


Fig.9 - Placa de material compósito instrumentada com a cabeça sensora proposta.

A Fig.9 mostra uma placa de material compósito (PRFC) na qual foi inserida uma cabeça sensora análoga à que foi descrita anteriormente. Pode observar-se que a reduzida dimensão do sensor permitiu a sua inclusão no material sem comprometer a integridade da sua estrutura, permitindo a recolha de informação em tempo real sobre o seu estado (temperatura e deformação segundo um eixo em simultâneo) e a previsão do seu desempenho a longo prazo. Esta placa de material compósito, ou outra constituída por materiais diferentes, poderá ser instrumentada com um elevado número de sensores inscritos ao longo de uma só fibra e interrogados por um único instrumento. Este tipo de materiais poderá ser depois acoplado a uma estrutura ou até ser parte

integrante dela, o que facilitará a monitorização multi-ponto e multi-parâmetro de edifícios inteligentes.

CONCLUSÃO

Foi idealizado e fabricado um sensor de fibra óptica composto por duas redes de Bragg escritas em fibra óptica de sílica e germânio e fibra óptica de sílica e germânio co-dopada com boro. Devido à co-dopagem com boro, as redes evidenciam diferentes sensibilidades à temperatura e sensibilidades análogas à deformação. Os resultados experimentais obtidos mostram que estas propriedades permitem ao sensor efectuar medição simultânea de temperatura e deformação. Mostrou-se também que as características da configuração proposta para a cabeça sensora são adequadas à sua inserção em materiais compósitos e ao desenvolvimento de estruturas inteligentes.

AGRADECIMENTOS

F. Farahi agradece o suporte financeiro da NSF grant DMI-9413966.

REFERÊNCIAS

- 1 J. D. C. Jones, "Review of fiber sensor techniques for temperature-strain discrimination", in *Proc. 12th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Williamsburg, USA, 1997, pp. 36-39.
- 2 H. Singh and J. Sirkis, "Simultaneous measurement of strain and temperature using optical fiber sensors: two novel configuration" in *Proceedings of the Eleventh International Conference on Optical Fiber Sensors* (Hokkaido University, Sapporo, Japan), pp. 108-111 (1996).
- 3 H. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, and A. M. Vengsarkar, "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination," *Photon. Technol. Lett.* 8, pp. 1223-1225 (1996).
- 4 S. E. Kanellopoulos, V. A. Handerek, and A. J. Rogers, "Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber gratings," *Opt. Lett.* 20, pp. 333-335 (1995).
- 5 M. G. Xu, J. -L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors", *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 1085-1087, 1994.
- 6 S. W. James, M. L. Dockney, and R. P. Tatam, "Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fiber Bragg grating sensors", *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1133-1134, 1996.
- 7 M. Sudo, M. Nakai, K. Himeno, S. Suzuki, A. Wada, and R. Yamauchi, "Simultaneous measurement of temperature and strain using PANDA fiber grating", in *Proc. 12th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Williamsburg, USA, 1997, pp. 170-173.
- 8 L. A. Ferreira, F. M. Araújo, J. L. Santos, and F. Farahi, "Simultaneous strain and temperature sensing using an interferometrically interrogated fibre Bragg grating written in bow-tie fibre", in *Proc. European Workshop on Optical Fibre Sensors*, Peebles, Scotland, 1998, pp. 49-53.
- 9 M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, "Simultaneous measurement of temperature and strain using two fibre Bragg gratings embedded in a glass tube", *Opt. Fibre Technol.*, vol. 3, pp. 194-196, 1997.
- 10 Y. L. Lo, "Using in-fibre Bragg-grating sensors for measuring axial strain and temperature simultaneously on surfaces of structures", *Opt. Eng.*, vol. 37, pp. 2272-2276, 1998.
- 11 O. V. Mazurin, M. V. Streltsina, and T. P. Shvaiko-Shavaikovskaya, "Handbook of Glass Data" (Elsevier Science, Amsterdam, 1985).
- 12 K. Shima, K. Himeno, T. Sakai, S. Okude, A. Wada, and R. Yamauchi, "A novel temperature-insensitive long-period fiber grating using a boron-codoped-germanosilicate-core fiber", in *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, Dallas, USA, 1997, pp. 347-348.
- 13 Y. G. Han, C. S. Kim, K. Ho, U. C. Paek, and Y. Chung, "Performance enhancement of strain and temperature sensors using long period fiber grating", in *Proc. 13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, Kyongju, Korea, 1999, pp. 170-173.
- 14 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection", *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 236-238, 1992.
- 15 F. Farahi, D. J. Webb, J. D. C. Jones, and D. A. Jackson, "Simultaneous measurement of temperature and strain: cross-sensitivity considerations", *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, pp. 138-141, 1990.
- 16 P. L. Xu, and T. Whitbread, "Stress transformation due to fusion splicing in optical fibre", *Electron. Lett.*, vol. 20, pp. 599-600, 1984.