

MODULADORES DE FASE BASADOS EN CALENTAMIENTO JOULE SOBRE FIBRAS HERMÉTICAS CUBIERTAS DE CARBONO

ANDRES GARCIA-RUIZ^{*1}, HUGO F. MARTINS¹, REGINA MAGALHÃES¹,
JOÃO M. B. PEREIRA^{2,3}, WALTER MARGULIS^{2,3},
SONIA MARTIN-LOPEZ¹, MIGUEL GONZALEZ-HERRAEZ¹
andres.garciaruiz@uah.es



Andrés García Ruiz completó su licenciatura en Física por la Universidad de Salamanca y actualmente es estudiante de doctorado en el Dpto. de Electrónica de la Universidad de Alcalá. Su trabajo se centra en el estudio y desarrollo de los fundamentos del sensado distribuido mediante fibra óptica basado en la técnica Φ OTDR así como en sus posibles aplicaciones.

Resumen: Ciertas aplicaciones de los sistemas de fibra óptica, como los sensores, la aviónica o el ámbito biomédico, implican condiciones extremas de humedad, presión o temperatura. Esto hace necesario el desarrollo de dispositivos de fibra dotados de un recubrimiento hermético al agua e hidrógeno. En este artículo se motiva la necesidad de estos dispositivos y se presenta un modulador de fase a modo de ejemplo y prueba de concepto.

Palabras clave: Sensores de fibra óptica, fibras ópticas con recubrimiento especial, efecto Joule, dispersión Rayleigh, reflectometría óptica en el dominio temporal

Abstract: Certain applications of fiber sensors (e.g. avionics, oil industry) imply extreme operating conditions spurring the development of hermetic all-fiber devices. We present a hermetic all-fiber phase modulator based on Joule heating in a carbon-coated fiber.

Keywords: Optical fiber sensors, optical fibers with special coatings, Joule effect, Rayleigh scattering, optical time domain reflectometry..

¹ Dpto. de Electrónica, Universidad de Alcalá.

² Dpto. de Fotónica en Fibra, RISE Acreo AB.

³ Dpto. de Física Aplicada, Royal Inst. of Technology.

1. INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos herméticos para fibras ópticas juegan un relevante papel en una gran diversidad de sistemas ópticos, pero pueden ser fundamentales en los que constituyen sensores de fibra. Muchos de los escenarios más frecuentes en los que estos sensores son empleados resultan ser extremadamente agresivos, especialmente dentro de sectores industriales como la extracción y transporte de petróleo y gas (Brown & Hartog, 2002), o incluso en cirugía no invasiva (Puangmali, Liu, Althoefer & Seneviratne, 2008). Los recubrimientos herméticos son en estos casos imprescindibles, al ofrecer una impermeabilidad total frente al agua e hidrógeno. Una delgada pero hermética barrera es capaz de proteger la fibra de la difusión de moléculas pequeñas en el vidrio de la fibra, que de otra forma acabarían produciendo atenuación óptica y la reducción de la resistencia mecánica de la fibra debida a la fatiga del material (Lemaire & Lindholm, 2007). Por estos motivos, siempre que un sistema es diseñado para funcionar en entornos extremos, en los que se expondrá a grandes variaciones de temperatura, presión o humedad, un recubrimiento hermético es considerado. Esto tiene implicaciones para todos los elementos comprendidos en tal sistema óptico, lo que destaca la importancia de desarrollar dispositivos basados sólo en fibra, y provistos de dichos recubrimientos.

Entre todos los posibles materiales, el carbono representa una de las elecciones más fiables para la fabricación de recubrimientos herméticos. Algunas de las aplicaciones más exigentes de los sistemas de fibra, como la industria aeroespacial, no pueden permitirse otras alternativas como los recubrimientos metálicos. Estos, como los de carbono, pueden aplicarse durante el proceso de fundido y estirado de la fibra, permitiendo la fabricación de grandes longitudes de esta fibra. Un recubrimiento metálico implicaría un sistema mucho más pesado y comprometerían su miniaturización, debido a las grandes pérdidas ópticas que inducen los radios de curvatura reducidos en dichas fibras. Por otro lado, la conductividad eléctrica que estos recubrimientos exhiben constituye una propiedad muy interesante para un recubrimiento de fibra en el ámbito de los sensores, y ha sido útil para el desarrollo de sensores químicos (Bai & Shi, 2007) o sensores de velocidad de fluidos (García-Ruiz et al., 2018), mientras que también tiene un papel central en el presente estudio.

En este trabajo, aprovechamos la conductividad eléctrica de un recubrimiento de carbono para proponer un modulador de fase en fibra controlado de forma electro-térmica. Gracias a una pequeña corriente aplicada en el recubrimiento a lo largo de un tramo de fibra óptica, es posible modificar el índice de refracción (n) de su núcleo de forma controlada mediante el incremento de temperatura debido al efecto Joule. Para comprobar la respuesta dinámica y la fiabilidad de este método, una muestra de esta fibra fue calentada eléctricamente

mientras un sensor basado en reflectometría óptica en dominio temporal sensible a fase con pulsos *chirpeados* (CP- Φ OTDR por su nombre en inglés, *Chirped-Pulse phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometry*) proporcionaba medidas de alta velocidad de repetición de las variaciones de índice refractivo de su núcleo. Este esquema de monitorización ha demostrado previamente la alta sensibilidad y respuesta dinámica (de rango acústico) en medidas de temperatura y deformación (Pastor-Graells, Martins, Garcia-Ruiz, Martin-Lopez & Gonzalez-Herraez, 2016), lo que lo convierte en el instrumento adecuado para la caracterización propuesta aquí. Los resultados experimentales son también corroborados por un modelo numérico.

2. PRINCIPIOS Y MONTAJE EXPERIMENTAL

La muestra de fibra monomodo (125 μm de diámetro) analizada en este trabajo estaba recubierta por una película de carbono de 20 nm de espesor, que fue aplicada durante su proceso de fundido y estirado. Dependiendo de las condiciones en las que esto se hace, es posible obtener una resistencia eléctrica longitudinal de entre 6.3 $\text{k}\Omega/\text{cm}$ y 3.7 $\text{k}\Omega/\text{cm}$, en el mejor de los casos. Toda la estructura está además protegida por un recubrimiento externo de acrilato con un grosor de aproximadamente 63 μm .

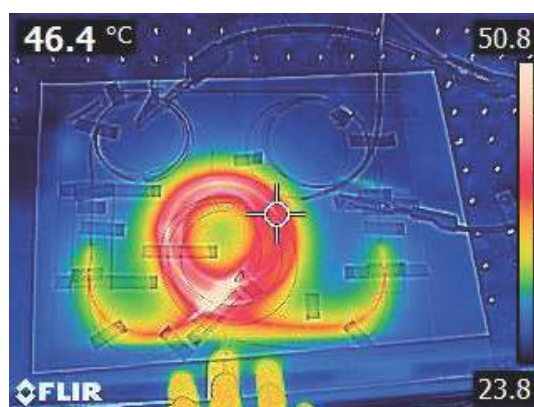


Figura 1. Imagen térmica de infrarrojos de la fibra óptica empleada en el experimento, con los contactos eléctricos hechos sobre el recubrimiento de carbono para inyectar la corriente. En esta imagen se ven los efectos térmicos de disipar entorno a 3 W/m.

Para las pruebas aquí discutidas, el recubrimiento externo fue eliminado en dos puntos, situados con una separación de 3 m, lo que permitió realizar sendos contactos eléctricos sobre el recubrimiento de carbono (Fig. 1). La resistencia

obtenida para el segmento entre los contactos era de $1.4 \text{ M}\Omega$ ($\sim 4.7 \text{ k}\Omega/\text{cm}$). Para inducir la excitación térmica de la fibra, y poder detectarla en su núcleo, una corriente eléctrica fue aplicada sobre la capa de carbono a lo largo de este tramo de fibra. El incremento de temperatura resultando pudo ser fácilmente medido con técnicas de termografía infrarroja (Fig. 1) cuando la densidad de potencia aplicada es de unos pocos vatios por metro. Sin embargo, se requiere de técnicas más refinadas para cuantificar el calentamiento producido para potencias menores y, sobre todo, para realizar el seguimiento dinámico del cambio de índice de refracción inducido por la señal intermitente de calentamiento, que es el objetivo del presente trabajo. Para medir en este régimen, una señal alterna a 50 Hz se aplicaba de forma repetitiva cada 10 s. Así se producía una respuesta cíclica de calentamiento y enfriamiento para distintas densidades de potencia disipadas (todas ellas menores de $\sim 12 \text{ mW/m}$). Estas condiciones de operación fueron comprobadas para asegurarnos de que la potencia inyectada no afectaba la calidad del recubrimiento de carbono. La resistividad del mismo no se vio alterada tras más de 10 horas sometido a ciclos de calentamiento correspondientes a $\sim 800 \text{ mW/m}$, lo que demuestra la durabilidad del modulador de fase propuesto. La fibra fue situada sobre una mesa óptica, donde estaba expuesta al aire a temperatura ambiente que la rodeaba. En esta situación, si consideramos que toda la potencia es disipada mediante convección y asumimos que se ha alcanzado el estado estacionario, la diferencia de temperatura con el estado no excitado (T_0) vendría dada por la ecuación (Bergman, Lavine, Incropera & DeWitt, 2011):

$$P = h S (T - T_c), \quad (1)$$

donde P es la potencia disipada por la fibra, S es el área de su superficie exterior, y el factor h representa la eficiencia del proceso de convección. Este parámetro aglutina diferentes dependencias con la geometría y materiales del cuerpo caliente, por lo que puede variar desde 2 a $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ para situaciones de convección natural en gases (Bergman, Lavine, Incropera & DeWitt, 2011). Este modelo ha sido usado previamente para describir la respuesta térmica de una fibra recubierta de cobre bajo condiciones similares a las aquí consideradas (García-Ruiz et al., 2018). La ecuación (1) se obtiene de la *Ley de enfriamiento de Newton*, que implica una evolución temporal de la temperatura del cuerpo de tipo exponencial, con amplitud A :

$$T(t) - T_c = A e^{-t/\tau}. \quad (2)$$

En este modelo, la constante de tiempo τ viene determinada por la capacidad calorífica de la fibra, su área exterior, y la eficiencia de convección. Es posible

obtener una estimación del rango de temperatura esperado para cierto valor de P considerando la ecuación 1. Si asumimos un valor de $h \sim 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, una potencia de unos pocos milivatios bastaría para calentar la fibra unos cientos de milikelvins. Este rango de variación de temperatura es suficiente para que pueda ser determinado de forma dinámica mediante un sistema CP Φ OTDR, descrito a continuación.

En un interrogador CP Φ OTDR, la frecuencial instantánea del pulso sonda varía de forma lineal (tiene *chirp* lineal) (Pastor-Graells, Martins, Garcia-Ruiz, Martin-Lopez & Gonzalez-Herraez, 2016). Los *ecos* consecutivos que resultan de la dispersión Rayleigh de estos pulsos, exhiben un retardo temporal que es proporcional a la variación del estímulo aplicado a la fibra. Así, calculando el retardo local $\delta t(z)$ a lo largo de la traza Rayleigh con respecto a una previo (referencia), la amplitud de este estímulo (temperatura $\delta T(z)$ o *strain* $\varepsilon(z)$) puede ser determinado para cada disparo. Además, la sensibilidad de este método hace posible obtener fácilmente resoluciones de temperatura/strain del orden del mK/nε. Como con un sistema Φ OTDR convencional, la frecuencial de disparo del interrogador solamente está limitada por el tiempo de vuelo de los pulsos en la fibra, es decir, por la longitud de la fibra sensora (algunos kHz para fibras de decenas de km). Esto convierte al sistema CP- Φ OTDR en un método adecuado para la medición distribuida de variaciones dinámicas de índice de refracción en situaciones en que se requiere también una gran sensibilidad. La relación entre el cambio local de índice relativo ($\Delta n(z)/n$) y el correspondiente retardo registrado puede ser deducido de estos principios, obteniéndose la siguiente expresión (Pastor-Graells, Martins, Garcia-Ruiz, Martin-Lopez & Gonzalez-Herraez, 2016):

$$\delta t(z) = \frac{v_0}{\delta v} \tau_p \frac{\Delta n(z)}{n}. \quad (3)$$

Aquí, τ_p representa la duración de los pulsos y v_0 y δv son su frecuencia central y rango del chirp, respectivamente. El coeficiente termo-óptico (Koyamada, Imahama, Kubota & Hogari, 2009),

$$\frac{\Delta n(z)/n}{\Delta T} = 6.92 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \quad (4)$$

puede aplicarse para obtener la variación de temperatura (en lugar de la variación de índice de refracción que esta produce) en términos del retardo local de la traza.

El montaje del sensor de temperatura empleado, en comparación con un interrogador Φ OTDR convencional, requiere medios adicionales para inducir el chirp del pulso y para realizar la adquisición de las trazas con el ancho de banda del mismo.

El chirp puede aplicarse de forma sencilla modulando periódicamente la corriente que alimenta al laser de emisión continua (1550 nm), y que es pulsado sincronamente antes de llegar a la fibra sensora (FUT, *Fiber Under Test*). Los pulsos de 30 ns de duración generados determinan la resolución espacial del sensor (3 m), que coincide con la longitud de la zona de fibra excitada térmicamente. La señal óptica devuelta por la fibra es amplificada y filtrada antes de detectarla en un fotodetector de tipo p-i-n de ancho de banda 1 GHz. Las trazas se digitalizan en un osciloscopio a una frecuencia de muestreo de 40 GSa/s osciloscopio (lo que proporciona una resolución en el cambio de índice de refracción relativo entorno a 10^{-8} para el chirp aplicado) y procesadas en tiempo real mediante un ordenador, que devuelve valores de índice de refracción o temperatura a una velocidad de repetición de 25 Hz.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

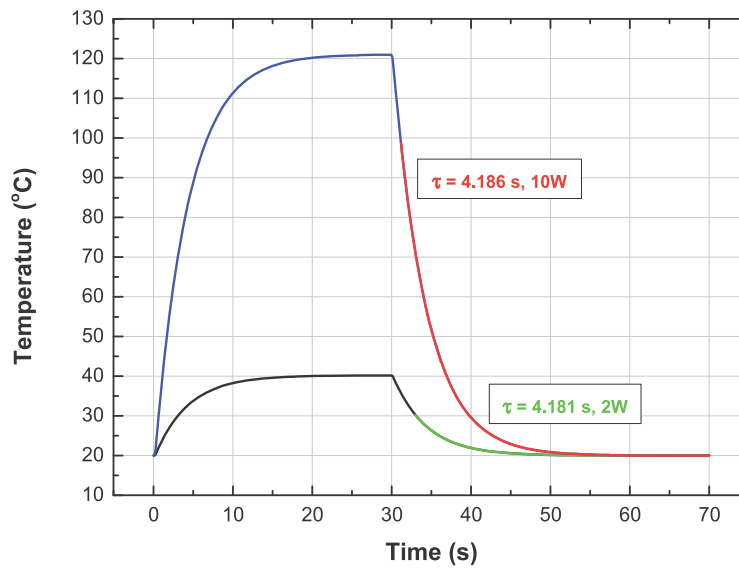


Figura 2. Respuesta simulada (FEM) considerando la geometría, composición y montaje experimental de la fibra estudiada, sometida a convección natural, $h = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Se realizó una simulación de las condiciones experimentales mediante un método de elementos finitos (FEM, *Finite Element Method*). Para ello se asumió una eficiencia de convección de $h = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Considerando el proceso de calentamiento y enfriamiento, el parámetro que caracteriza la dinámica del sistema, que es independiente de la potencia aplicada, fue determinado (Fig. 2) por ajuste de la evolución de la temperatura a la expresión exponencial de la ecuación 2. Este es el comportamiento esperado para la comprobación experimental. El valor obtenido para la constante de tiempo es $\tau^{\text{sim}} = 4.18 \text{ s}$.

En la Figura 3(a) se ha representado el resultado del sensor CP- Φ OTDR. Se puede observar que las oscilaciones de índice de refracción normalmente registradas durante los ciclos de calentamiento responden a un patrón repetitivo de curvas exponenciales. Esta gráfica corresponde a la menor de las densidades de potencia empleadas en el experimento (4 mW/m). Los datos obtenidos para cada valor de potencia disipada se analizaron en el dominio temporal y en el de frecuencias, permitiendo realizar un filtrado *paso-alto* de la señal con el objetivo de las variaciones lentas de temperatura ambiente registradas por el sistema. La amplitud de las variaciones también fue medida en el dominio de frecuencias, ofreciendo un valor promediado de todos los ciclos registrados para cada potencia disipada. Dichas amplitudes se representan en términos de cambio de índice de refracción frente a la potencia aplicada a la fibra en la Fig. 3(b). El ajuste lineal mostrado proporciona la sensibilidad característica de la muestra de fibra con recubrimiento de carbono empleada en términos del cambio relativo de índice de refracción (RIU, *Refractive Index Units*): $19.7 \cdot 10^{-6}$ RIU/W para una fibra estándar con $n \sim 1.46$.

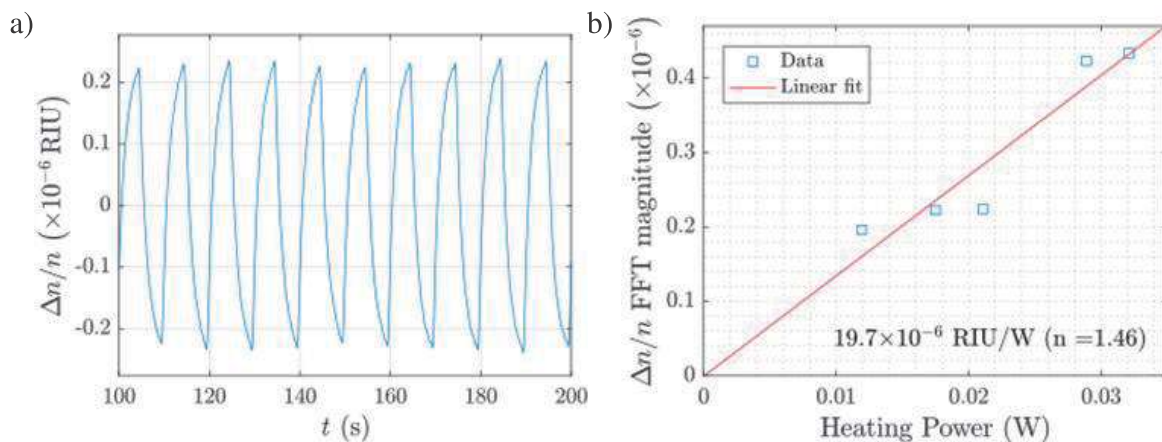


Figura 3. a) Ciclos de variación de índice relativo típicamente producidos al disipar 4 mW/; b) Amplitud de los ciclos para distintos valores de potencia eléctrica aplicada.

La señal en dominio temporal fue troceada para realizar el promedio de todos los ciclos correspondientes a cada potencia disipada. Se muestra un ejemplo de este procesado en la Fig. 4, para el que la densidad de potencia es 4 mW/m. Asimismo, se muestra el ajuste exponencial realizado sobre dicho promedio para obtener el tiempo característico τ de la fibra. El valor promedio y desviación estándar de los valores obtenidos es $\langle \tau^{\text{exp}} \rangle = (1.7 \pm 0.1)$ s. Este resultado final se corresponde en orden de magnitud con las simulaciones. Sin embargo, cabe señalar la variabilidad implícita en el modelo, pues algunos de los parámetros teóri-

cos, como la eficiencia de convección h , no son sencillos de estimar o de controlar en el experimento.

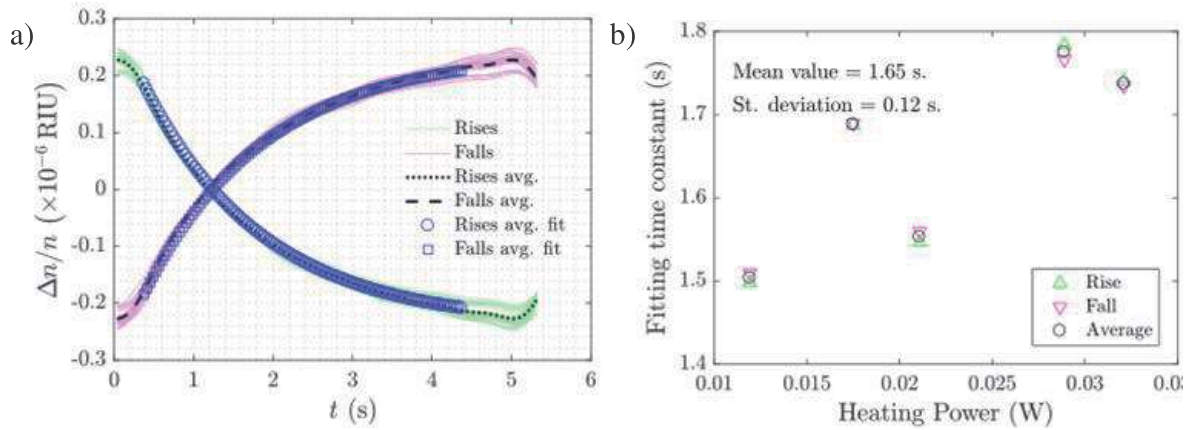


Figura 4. a) Curvas de variación de índice relativo obtenidas, su promedio y su ajuste exponencial (4 mW/m disipados en el caso mostrado); b) Constantes de tiempo obtenidas para cada potencia aplicada, obtenidos de los ajustes análogos al ejemplo (a).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra la viabilidad de un modulador de fase basado en calentamiento Joule para controlar el cambio de índice de refracción en una fibra óptica con recubrimiento de carbono. Debido a la naturaleza térmica del mecanismo de funcionamiento, una dinámica relativamente lenta ha sido obtenida teórica y experimentalmente, haciendo de la propuesta sólo aplicable a sistemas que requieran modulación en el rango de unos pocos Hz (si no se aplican mayores densidades de potencia de control). A pesar de ello, esta velocidad de respuesta puede ser mejorada variando las propiedades térmicas del medio que rodea la fibra de forma que se mejore la eficiencia de los mecanismos de disipación de calor implicados. Por otro lado, esto también implicaría una reducción del rango de variación de índice aplicable para una densidad de potencia fija.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por: el ERC a través del proyecto U-FINE (gr. 307441) y el programa FP7 ITN ICONE (gr. 608099); EC H2020 y el MINECO (proyecto DOMINO, ERANET Cofund Water Works 201); el proyecto FINESSE MSCA-ITN-ETN-722509; el MINECO (proyecto TEC2015-71127-C2-2-R y contrato «Ramón y Cajal»); y la Universidad de Alcalá (contrato FPI).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bai, H. & Shi, G. (2007). Gas sensors based on conducting polymers. *Sensors*, 7, pp. 267-307.
- Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. & DeWitt, D.P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. Jefferson City: John Wiley & Sons.
- Brown, G.A. & Hartog, A. (2002). Optical fiber sensors in upstream oil & gas. *Journal of Petroleum Technology*, 54, pp. 63-65.
- Garcia-Ruiz, A., Dominguez-Lopez, A., Pastor Graells, J., Martins, H. F., Martin Lopez, S. y Gonzalez Herraez, M. (2018). Long-range distributed optical fiber hot-wire anemometer based on chirped-pulse Φ OTDR. *Optics Express*, 26, pp. 463-476.
- Koyamada, Y., Imahama, M., Kubota, K. & Hogari, K. (2009). Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR. *Journal of Lightwave Technology*, 27, pp. 1142-1146.
- Pastor-Graells, J., Martins, H. F., Garcia-Ruiz, A., Martin-Lopez, S. & Gonzalez-Herraez, M. (2016). Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses. *Optics Express*, 24 (12), 13121-13133.
- Puangmali, P., Liu, H., Althoefer, K. & Seneviratne, L. D. (2008). Optical fiber sensor for soft tissue investigation during minimally invasive surgery. En *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp. 2934-2939.