

تحليل أداء مجس الألياف البصرية المستخدم لقياس شدة المجال الكهربائي

سلمى محمد حسين* عدي عطا حمادي** رانيا عايد مركب**

تاريخ قبول النشر ٢٠٠٥/٥/٢

الخلاصة

في هذا البحث ، جرى تقديم نتائج لتحليل أداء مجس الألياف البصرية المستخدم لقياس وتحسس شدة المجال الكهربائي. بينت النتائج المستحصلة أن استخدام مجس طويل يعطي استجابة عالية لشدة المجال الكهربائي وقيمة عالية لتحسسية المجس ، إلا أن ذلك يتم على حساب تقليل شدة المجال الكهربائي التي يتم الكشف عنها. ولأجل الحصول على استجابة واسعة لشدة المجال ومنتظمة نسبياً يتم استبدال دالة الاستجابة الفعلية بدالة أخرى تتحدد تحليلياً.

المقدمة

استأثرت مجسات المجال الكهربائي والهوائيات التي توظف الألياف البصرية باهتمام الباحثين مؤخراً بشكل كبير [1-3]. يتم تصنيع مثل هذه المجسات من خلال طلاء الليف البصري ذي النمط المنفرد بمادة نشطة كهروبصرياً وعند تعريض المجس إلى مجال كهربائي متناوب فإن الموجات الراديوية الناتجة تحدث تضميناً لمعامل انكسار مادة الليف. هذا التضمين يسبب إزاحة طورية يمكن الكشف عنها بشكل إشارة كهربائية باستخدام مقياس التداخل الذي يوظف الألياف البصرية والكواشف الضوئية. إن حساسية هذه المجسات تزداد خطياً مع طول المجس عند الأطوال الموجية الطويلة ، إلا أن زيادة طول المجس بشكل كبير تؤدي إلى تقليل الحساسية وقد تصل إلى الصفر عند الأطوال الموجية القصيرة [4].

هنالك العديد من التطبيقات التي توظف هذا النوع من المجسات وإن مجسات الألياف البصرية المصنعة من المواد العازلة كهربائياً تعمل كهوائيات استلام فقط إذ أنها لا تخضع لقواعد التبادل التي تعمل وفقها الأنواع التقليدية من الهوائيات. إن هذه الخاصية تجعل هذه المجسات مفيدة للعمل كهوائيات استلام ذات مساحة مقطع عرضي مقاربة للصفر. كذلك فإن هوائيات الألياف البصرية تكون محصنة تجاه النبضات الكهرومغناطيسية (EMP) والشحنات الكهربائية المستقرة [1].

علاوة على ذلك ، فإن هوائيات الألياف البصرية يمكنها استلام الحزم ذات الترددات الواطئة جداً إذ أن الهوائيات التقليدية بصورة عامة تكون ذات حجم كبير جداً وكفاءة واطئة بسبب الخسائر الناتجة عن درجة ترابط مكونات الشبكة.

النموذج النظري

تعطى إزاحة الطور (ϕ) الناتجة عن طول (L) لليف بصري موضوع في مجال كهربائي شدته (E) بالعلاقة الآتية:

$$\phi = \eta EnkL \quad (1)$$

حيث k هو العدد الكمي للحامل البصري و n معامل انكسار مادة الليف و η حساسية المجس للمجال الكهربائي. يمكن تبسيط العلاقة (1) من خلال تعريف الحساسية التبادلية للمجس (S) والتي تمثل حاصل ضرب إزاحة الطور بشدة مجال كهربائي مقدارها (1V/m) لطول (1m) من الليف البصري ، فتصبح:

$$\phi = SEL \quad (2)$$

إن القيمة النموذجية لعامل الحساسية التبادلية (S) للمجس تكون بحدود (50 μ rad/V) [4] وباستخدام مقياس تداخل (Interferometer) نموذجي ، فإن أدنى إزاحة طور يمكن الكشف عنها بحدود (1 μ rad/Hz) تجعل من الممكن كشف مجال كهربائي شدته $0.02V/\sqrt{Hz}$ لطول (1m) من الليف البصري. ولأجل كشف إشارات قيمتها (1 μ VHz^{1/2}) يتوجب استخدام ليف بصري بطول عدة كيلومترات على فرض أن الليف يمتد بشكل مستقيم [5].

عندما يكون زمن مرور الإشارة الضوئية خلال مجس طويل مقارب للفترة الزمنية التي يتم خلالها كشف المجال الكهربائي ، فإن المجس الكهربائي في المعادلة (2) لا يبقى ثابتاً. هذا التحليل يقدم الاستجابة الترددية لمجس طويل إذ تكون استتالة الليف البصري (أي مقدار التغير في طول الليف L) صغيرة مقارنة بالطول

* قسم العلوم التطبيقية ، الجامعة التكنولوجية ، بغداد ، العراق

** ص . ب . ٥٥١٥٩ ، بغداد ١٢٠٠١ ، العراق

عند رسم $(\phi/SE_0\lambda)$ مقابل (L/λ) ، كما في الشكل (2)، فإنه تتضح الزيادة الخطية في قيمة التحسسية إلى الحد الذي يمكن اعتباره طويلاً من ناحية التحسسية الكهربائية إذ لا يتم تحقيق زيادة أكبر في قيمة التحسسية. إن القيم الصفرية للتحسسية تنتج عندما يكون طول الليف البصري كبيراً.

إن عرض الحزمة الترددية (f_{3dB}) للمجس عند شدة مقدارها (3dB) يتحدد بطول المجس ، وفي حالة تردد $(U=1.39)$ فإنه يعطى بالعلاقة الآتية:

$$(7) \quad f_{3dB} = \frac{1.39c}{\pi nL} = \frac{88.5 \text{ MHz}}{L}$$

حيث (L) طول المجس. وعليه ، فمن أجل الحصول على عرض حزمة مقداره (88.5 kHz) فإنه يتوجب العمل عند طول (1 km) للليف.

من الشكل (1) والشكل (2) ، يلاحظ أنه لا يفضل العمل في المنطقة الطويلة كهربائياً بسبب تكون القيم الصفرية للاستجابة والتي تنشأ عن إجراء التكامل للدالة المتناظرة عبر مضاعفات الدورة وكما في المعادلة (4). يمكن إلغاء القيم الصفرية للاستجابة من خلال إضافة حدود تعبر عن عدم التناظر إلى الدالة نفسها. وذلك يتم من خلال جعل التحسسية (S) دالة للموقع (z) . أي أنه لأجل حذف القيم الصفرية للدالة $S(z)$ ، يجب ألا تكون هذه الدالة متناظرة حول $z=L/2$.

لذلك ، يتم اختيار دالة خطية تعرف كالآتي:

$$(8) \quad S(z) = S_0 \left[1 + \left(\frac{\tau-1}{L} \right) z \right]$$

حيث S_0 التحسسية الابتدائية للمجس و τ معامل خاص بنوع الليف و قيمته $0 \leq \tau \leq 1$.

ومن خلال استبدال دالة التحسسية (S) في المعادلة (4) بالدالة $S(z)$ في المعادلة (8)، ينتج

$$(9) \quad \phi = \int_0^L S \left[1 + \left(\frac{\tau-1}{L} \right) z \right] E e^{-i\omega z} dz$$

وهذا التكامل يتضمن جزئين ، حقيقي وخيالي ، كما يأتي:

$$(10) \quad \text{Re} \phi = S \left\{ \frac{\sin 2\tau L}{2\tau L} + (\tau-1) \left[\frac{\sin 2L}{2L} + \frac{\cos 2L - 1}{4L} \right] \right\}$$

$$(11) \quad \text{Im} \phi = S E L \left\{ \frac{1 - \cos 2\tau L}{2\tau L} + (\tau-1) \left[\frac{\sin 2L}{4L} - \frac{\cos 2L}{2L} \right] \right\}$$

وإن قيمة ϕ تعطى كالآتي:

$$(12) \quad \phi = \sqrt{(\text{Re} \phi)^2 + (\text{Im} \phi)^2}$$

الموجي لموجة المجال الذي يتم كشفه ، إلا أن زمن العبور خلال الليف البصري يكون طويلاً بشكل كافٍ مقارنة بزمن دورة المجال الكهربائي [6]. إن هذا التحليل يتناول فقط تأثير طول الليف البصري على الاستجابة الترددية.

إذا كان المجال الكهربائي متغيراً مع زمن العبور خلال المجس ، يتم إجراء التكامل لإزاحة الطور المحتثة بواسطة المجال الكهربائي لأجل الدقة. وعليه فإن زمن العبور (τ) يرتبط بالمسافة التي ينتقل بها الضوء خلال المجس (z) على افتراض أن تأثير المجال الكهربائي على قيمة معامل الانكسار (n) يكون مهملاً ، وكما يأتي:

$$(3) \quad \tau = nz / c$$

حيث c سرعة الموجة الكهرومغناطيسية في الفراغ.

إن معادلة حساب إزاحة الطور الناتجة عن المجال الكهربائي لا تطابق المعادلة (2) وإنما تحسب كالآتي:

$$(4) \quad \phi = \int_0^L SE_0 e^{i\omega z} dz$$

وبتعويض المعادلة (3) في المعادلة (4) وإجراء التكامل ، يصبح:

$$(5) \quad \phi = SE_0 L \frac{|\sin U|}{U}$$

حيث

$$(6) \quad U = \frac{\pi f n L}{c} = \frac{\pi n L}{\lambda}$$

حيث أن U هو تردد التقويم على طول الليف و λ الطول الموجي لموجة المجال المغناطيسي في الفضاء الحر. نفترض أن انتشار الموجة داخل الليف مع الطول يكون مثالياً أي أن الخسائر يمكن إهمالها.

النتائج والمناقشة

عند الترددات الواطئة ، يتم اختزال المعادلة (5) إلى المعادلة (2) وبين الشكل (1) تغير الاستجابة المقومة للمجس لوحدة الطول (ϕ/SE_0L) كدالة لتردد التقويم (U) من الشكل يلاحظ أن ذروات الاستجابة تظهر عند شدة (20dB) فيما تهبط إلى الصفر عند قيم التردد U التي تمثل مضاعفات π . كما يلاحظ أن قيمة الاستجابة تقل بمقدار (3dB) عند تردد $(U=1.39)$ أو $(L=0.25\lambda)$ لمعامل الانكسار $(n=1.5)$.