

QUÁ TRÌNH PHÂN CỰC VÀ DẪN ĐIỆN CỦA VẬT LIỆU PEN DƯỚI ỨNG SUẤT ĐIỆN - NHIỆT

POLARIZATION AND CONDUCTION PROCESSES OF PEN FILM UNDER THERMO - ELECTRICAL STRESSES

Hoàng Mai Quyên^{1,*}, Nguyễn Mạnh Quân¹

TÓM TẮT

Phép đo dòng điện phân cực sole (APC), dòng điện dẫn ở điện trường cao và điện phát quang (EL) được thực hiện trên vật liệu poly(ethylene naphthalene 2,6-dicarboxylate) (PEN) - một polyester cực tính cao. Mục đích của nghiên cứu là tìm hiểu quá trình phân cực và dẫn điện trong vật liệu dưới tác dụng của ứng suất điện - nhiệt. Khi đặt điện môi dưới điện trường và nhiệt độ thấp, những đường đặc tính dòng điện - thời gian đo được tuyến tính trong hệ tọa độ logarit, chứng tỏ chúng được hình thành bởi chủ yếu là quá trình phân cực. Tuy nhiên, những kết quả nhận được ở điện trường và/hoặc nhiệt độ cao lại cho những đường đặc tính phi tuyến, ở đây quá trình phân cực và dẫn điện cùng nhau góp phần hình thành nên dòng điện ngoài. Từ phép đo EL, điện trường ngưỡng được xác định trong khoảng từ 210 đến 240kV/mm đối với tất cả các nhiệt độ đo. Từ điện trường này, tín hiệu EL được coi như gây ra bởi sự kết hợp của các điện tích trái dấu.

Từ khóa: PEN; phân cực điện; dẫn điện; APC; điện phát quang

ABSTRACT

Alternate polarization current (APC) measurements, conduction current at high electrical field and electroluminescence (EL) measurements were carried out on poly(ethylene naphthalene 2,6-dicarboxylate) (PEN), a polar polyester. The aim to develop and understanding of the polarization and conduction processes at play in this material under thermo-electrical stresses. When polarizing at low field and at low temperature, linear current-time curves were observed in logarithm scale, so dominant polarization process associated. However, results observed at high field or/and high temperature shown non-linear characteristics, so polarization and conduction processes associated. For the EL measurements, a threshold field was determined at environ from 210 to 240kV/mm for all temperatures. From this field, the EL signal observed was interpreted as deriving from recombination of opposite sign charges.

Keywords: PEN; polarization; conduction; APC; electroluminescence.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: hoangmaiquyen@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/01/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/3/2018

Ngày chấp nhận đăng: 21/8/2018

Phản biện khoa học: TS. Trần Anh Tùng

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
σ	S/m	Điện dẫn suất
U	V	Hiệu điện thế

I	A	Cường độ dòng điện
E	V/m	Cường độ điện trường
J	A/m ²	Mật độ dòng điện
S	m ²	Tiết diện của điện cực
d	m	Chiều dày lớp điện môi

CHỮ VIẾT TẮT

PEN	Poly(ethylene naphthalene 2,6-dicarboxylate)
APC	Alternate polarization current
LDPE	Low-density polyethylene
HDPE	High-density polyethylene
PET	Polyethylene terephthalate
EL	Electroluminescence
cps	Counts per second

1. GIỚI THIỆU

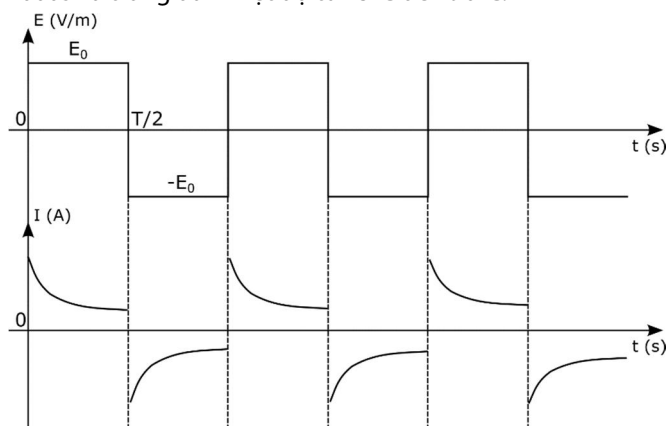
Vật liệu cách điện rắn được sử dụng ngày càng rộng rãi trong các ngành kỹ thuật điện, điện tử và công nghiệp năng lượng. Nhờ những ưu điểm nổi trội về khả năng cách điện và độ bền, chúng được sử dụng như là cách điện chính của cáp, động cơ, tụ điện... Việc nghiên cứu về các hiện tượng vật lý xảy ra bên trong vật liệu cách điện khi đặt dưới tác dụng của các ứng suất điện - nhiệt là rất cần thiết. Những quá trình xảy ra bên trong vật liệu có thể làm thay đổi điện trường ngoài, tính chất cơ học và tuổi thọ của vật liệu, từ đó tác động đến quá trình làm việc của thiết bị và hệ thống. Quá trình phân cực và dẫn điện là hai quá trình chủ yếu xảy ra trong chế độ làm việc bình thường của vật liệu cách điện khi đặt dưới tác dụng của điện trường. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm cũng như mô phỏng về hai hiện tượng phân cực và dẫn điện đã được thực hiện trên nhiều vật liệu cách điện rắn khác nhau [1-5], trong đó nhiều nhất là các nghiên cứu về hiện tượng dẫn điện trong vật liệu Polyethylene - một vật liệu được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi với các thông số vi mô bên trong vật liệu đã được xác định từ nhiều thí nghiệm trước đó. Tuy nhiên, sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghiệp polymer đã cho ra đời nhiều vật liệu mới có độ bền cách điện, độ bền nhiệt và tuổi thọ cao hơn. Trong bài báo này, chúng tôi lựa chọn nghiên cứu thực nghiệm trên vật liệu PEN, một loại vật liệu cách điện có cực tính cao (polar material) do đó giúp làm

nổi bật hiện tượng phân cực của vật liệu. Nghiên cứu của chúng tôi nằm trong mục đích đặc tính hóa các hiện tượng vật lý xảy ra trong quá trình làm việc của vật liệu PEN cũn như xác định các thông số vi mô bên trong vật liệu từ đ giúp mô hình hóa và cải thiện điều kiện sử dụng vật liệ này trong thực tế. Chúng tôi sử dụng các phương phá thực nghiệm như APC, phép đo dòng điện dưới điệ trường cao và phép đo điện phát quang để thu được cá đường đặc tính về dòng điện ngoài và sự phát quang the thời gian, qua đó phân tích sự ảnh hưởng và vai trò của qu trình phân cực và dẫn điện lên vật liệu cách điện dưới ứn suất điện - nhiệt.

2. MẪU VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐO

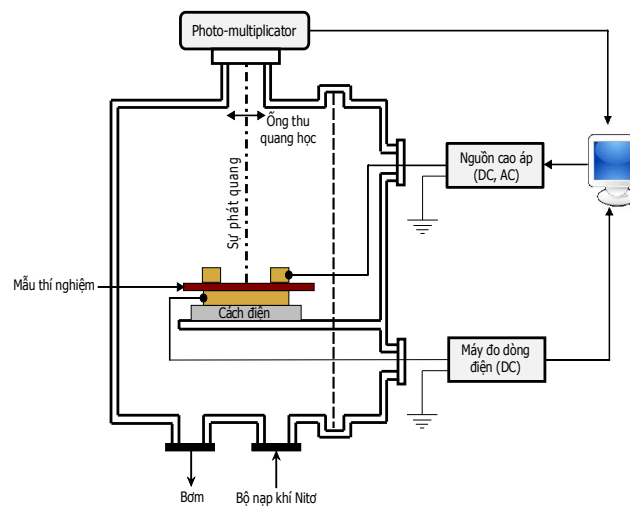
Vật liệu thí nghiệm là PEN bán kết tinh dạng phim, c nhiệt độ nóng chảy là 269°C và nhiệt độ thủy tinh hóa l 121°C [6].

Với mục đích thu được dòng điện thuần phân cực phương pháp thực nghiệm APC (dòng điện phân cực so l [7] được thực hiện trên vật liệu PEN. Với những điện trườn có giá trị rất nhỏ được đặt lên hai cực của mẫu thí nghiệm hiện tượng phun điện tích không gian vào bên trong th tích điện môi và dòng điện dẫn đạt cực tiểu, thậm chí c thể bỏ qua ở những nhiệt độ đo thấp. Phương thức đo thụ nghiệm được giới thiệu trên hình 1. Vật mẫu được đặt dưc lần lượt các điện trường có cường độ E_0 và $-E_0$ trong nhiều nửa chu kì $T/2$. Cực điện trường được thay đổi sau mỗi nửa chu kì có tác dụng loại trừ "hiệu ứng bộ nhớ" của những lần tác dụng liên tiếp của điện trường [8]. Nghĩa là, dòng điện đo được trong lần tác dụng của điện trường sau không bị hưởng bởi những lần tác dụng của điện trường trước đó. Dòng điện thu được sau cùng là dòng trung bình của tất cả các dòng điện đo được trong các nửa chu kì. Việc này giúp loại bỏ nhiều của dòng điện thu được. Điều này rất quan trọng do dòng điện phân cực dưới điện trường thấp có giá trị rất nhỏ và chỉ lớn hơn độ chính xác của dụng cụ đo một ít. Trong nghiên cứu của chúng tôi, mẫu thí nghiệm có độ dày $188\mu\text{m}$, đường kính 80mm , tại trung tâm mỗi mặt phim được phủ một lớp kim loại bằng vàng có đường kính 60mm và độ dày 30nm . Chúng tôi đã đặt vật mẫu dưới điện trường thấp có cường độ $0,05\text{kV/mm}$ trong 5 nửa chu kì 1000s và trong dải nhiệt độ từ 25°C đến 90°C .



Hình 1. Phương thức đo APC

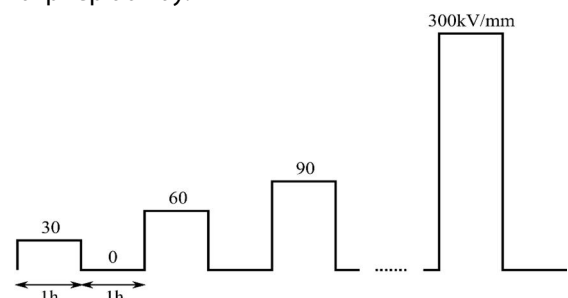
Với mục đích thu được dòng điện tích hợp hai hiện tượng phân cực và dẫn điện, phép đo dòng điện dưới điện trường cao và phép đo điện phát quang [9] được thực hiện



Hình 2. Thiết bị thí nghiệm của phép đo điện phát quang

Điện áp cao được cung cấp từ nguồn một chiều có khả năng thay đổi giá trị điện áp tự động nhờ phương thức cài đặt sẵn điện áp trong máy tính trước thí nghiệm. Khi điện áp đặt lên hai cực của vật mẫu, dòng điện đi qua điện môi được đo bởi máy đo dòng có độ chính xác đến $5 \cdot 10^{-15}\text{A}$. Hệ thống điện cực và vật mẫu được đặt trong một vỏ kim loại rỗng và kín. Vỏ kín này giúp điều khiển áp suất khí bên trong và tránh ánh sáng bên ngoài lọt vào. Khí bên trong lớp vỏ kim loại được rút tới trạng thái chân không với áp suất 10^{-9}bar . Sau đó khí Nitơ được bơm vào làm môi trường thí nghiệm giúp giảm nhiễu cho dòng điện đo được. Nhiệt độ thí nghiệm có thể được điều chỉnh từ -20 tới 90°C với sự trợ giúp của một bộ nguồn nhiệt và hệ thống tuần hoàn nước. Ống nhân quang điện (Photo-multiplier) nhận những photon được phát ra từ vật liệu trong quá trình tác dụng của điện áp, sau đó chuyển đổi thành tín hiệu điện và được ghi lại bởi máy tính.

Trong phép đo dòng điện dưới điện trường mạnh và phép đo điện phát quang, chúng tôi sử dụng các vật mẫu PEN dày $25\mu\text{m}$, đường kính 100mm , tại trung tâm mỗi mặt phim được phủ một lớp kim loại bằng vàng có đường kính 50mm và độ dày 30nm . Hình 3 giới thiệu phương thức đo của hai phép đo này.



Hình 3. Phương thức đo của phép đo dòng điện và điện phát quang

Cường độ điện trường được tăng từ 30 đến 300kV/mm (gần giá trị cường độ điện trường đánh thủng của PEN), với các bước tăng là 30kV/mm. Với mỗi giá trị của cường độ điện trường, vật mẫu được đặt dưới điện trường trong một giờ, sau đó khử phân cực trong một giờ. Các phép đo được thực hiện trong dải nhiệt độ từ nhiệt độ phòng (25°C) đến 90°C.

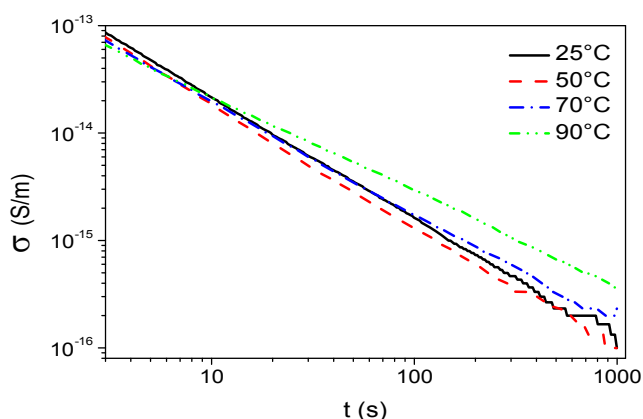
3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Dòng điện đo tại điện trường thấp (APC)

Để loại bỏ ảnh hưởng của tiết diện điện cực, độ dày lớp điện môi trong so sánh các dòng điện đo được bởi các phương pháp đo khác nhau, chúng tôi chuẩn hóa dòng điện bằng cách sử dụng đại lượng điện dẫn suất σ . Với σ được tính theo công thức (1).

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{I.d}{S.U} \quad (1)$$

Hình 4 biểu diễn điện dẫn suất (dòng điện chuẩn hóa) trong PEN theo thời gian tại những nhiệt độ khác nhau. Với các nhiệt độ không vượt quá 70°C, điện dẫn suất giảm tuyến tính theo thời gian trong hệ tọa độ logarit thập phân. Ở nhiệt độ 90°C, sự giảm tuyến tính chỉ được quan sát thấy ở khoảng thời gian ngắn, sau đó, điện dẫn suất có xu hướng giảm chậm hơn theo một đường không tuyến tính.



Hình 4. Điện dẫn suất đo ở điện trường thấp bằng phương pháp APC

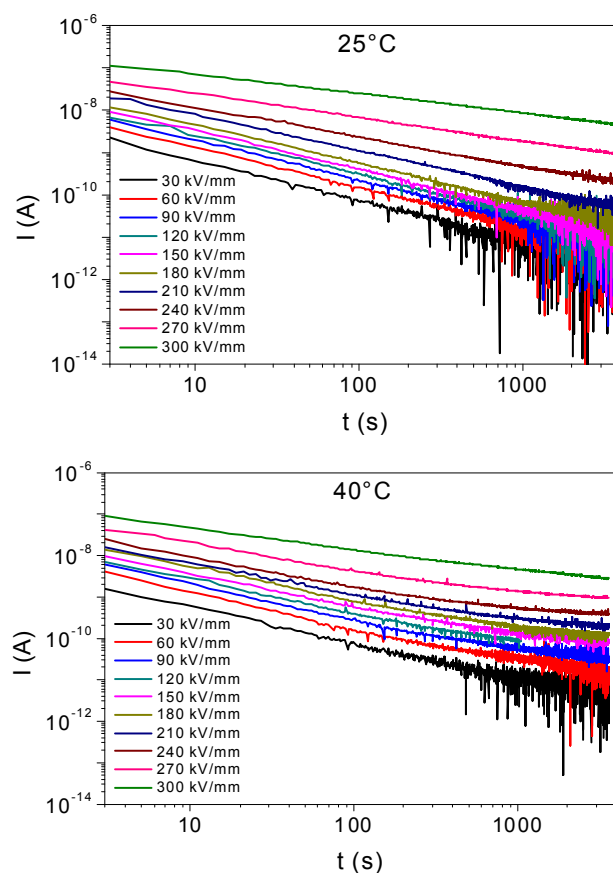
Dòng điện chạy qua lớp điện môi dưới tác dụng của điện trường được phân tích thành hai thành phần: thành phần do hiện tượng phân cực chậm (phân cực định hướng hoặc phân cực lưỡng cực) gây ra gọi là dòng điện phân cực; và thành phần do hiện tượng dẫn điện bởi các điện tích không gian trong khối điện môi gây ra gọi là dòng điện dẫn. Dòng điện phân cực giảm tuyến tính theo thời gian trong hệ trục tọa độ logarit thập phân. Dòng điện dẫn giảm chậm hơn dòng điện phân cực và có xu hướng tiến tới một giá trị xác lập [4]. Dòng điện này tăng theo lượng điện tích không gian được phun vào thể tích khối điện môi theo cơ chế Schottky [10,11]. Theo đó, khi cường độ điện trường và nhiệt độ tăng, lượng điện tích không gian xuất hiện trong khối điện môi càng nhiều và dòng điện dẫn càng tăng. Như vậy, chúng ta có thể xem rằng, cho đến 70°C, dòng điện đo được tại điện trường thấp chủ yếu do quá trình phân cực gây nên. Tuy nhiên, khi nhiệt độ tăng, quá trình phân cực chỉ thống trị trong khoảng thời gian ngắn (phần đầu đường

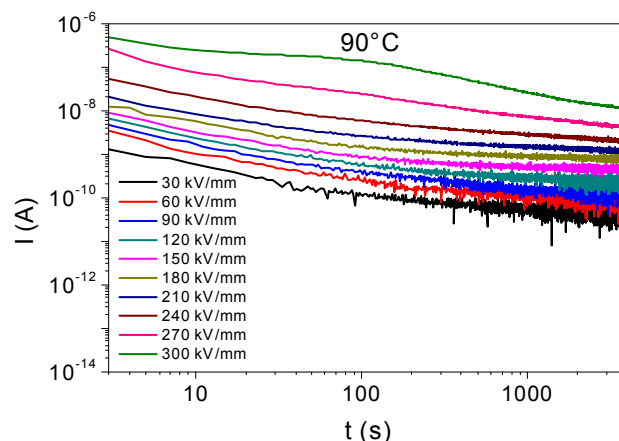
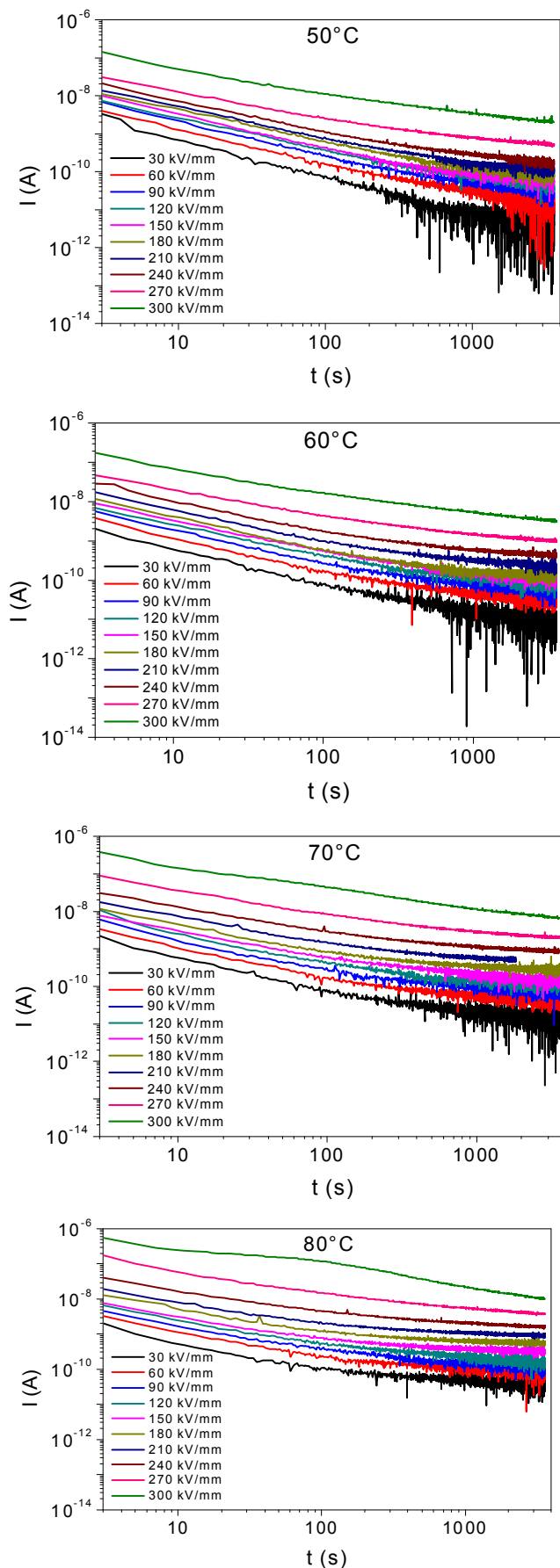
đặc tính) và quá trình dẫn điện trở thành quá trình chủ yếu trong khoảng thời gian dài (phần sau đường đặc tính). Nếu nhiệt độ đủ lớn, phương pháp APC không thể phản chiếu được hiện tượng phân cực cho dù điện trường tác dụng lên điện môi là rất thấp [12].

3.2. Dòng điện đo tại điện trường cao

Hình 5 giới thiệu đặc tính dòng điện - thời gian với các giá trị khác nhau của điện trường và nhiệt độ. Với từng giá trị của điện trường và nhiệt độ, dòng điện đo được giảm theo thời gian, tuy nhiên, chúng chưa đạt đến chế độ xác lập. Tại những nhiệt độ thấp (25, 40, 50°C), trong khi vật mẫu đặt dưới những điện trường có cường độ thấp, các dòng điện đo được tuyến tính theo thời gian trong thang logarit, và chúng có thể được gây ra bởi quá trình phân cực định hướng. Những đường đặc tính dòng điện - thời gian đo được ở những nhiệt độ hoặc điện trường cao hơn thay đổi độ dốc, gắn liền với sự thay đổi về bản chất của quá trình tạo ra dòng điện. Độ dốc ban đầu gây ra chủ yếu bởi quá trình phân cực định hướng ở thời gian ngắn, độ dốc phía sau gây ra chủ yếu bởi quá trình dẫn điện.

Tại những nhiệt độ 70, 80, 90°C, trên đường đặc tính dòng điện - thời gian tương ứng với điện trường 300kV/mm, chúng ta quan sát thấy một đỉnh của dòng điện. Hiện tượng này cũng được quan sát bởi nhiều tác giả khác nhau trên nhiều vật liệu, như LDPE [13], HDPE [14], PET và PEN [15]. Đỉnh dòng điện này được giải thích bởi tất cả các tác giả là do các điện tích không gian trong lòng khối điện môi gây nên.



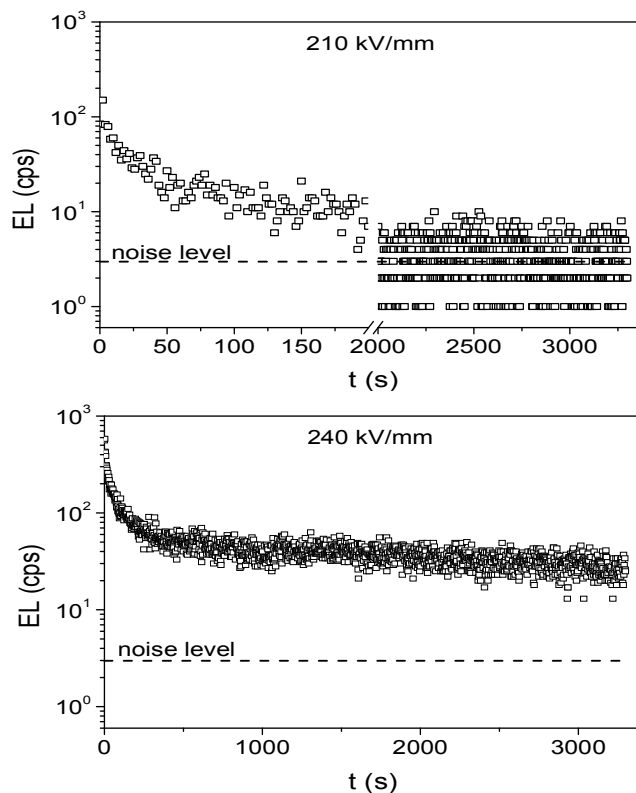


Hình 5. Dòng điện đo dưới điện trường cao với các giá trị khác nhau của điện trường và nhiệt độ

3.3. Điện phát quang

Những thí nghiệm về điện phát quang (EL) chỉ mô tả được quá trình quá độ về sự phát quang ở những điện trường có giá trị cao hơn một điện trường nào đó, gọi là điện trường ngưỡng. Trong thực tế, ở những điện trường có giá trị thấp hơn điện trường ngưỡng, tín hiệu EL đo được còn nhỏ hơn mức nhiễu ($\text{noise level} = 3\text{cps}$) của phép đo.

Chúng tôi lựa chọn giới thiệu trên hình 6 những đặc tính EL-thời gian đo được ở 25°C tại hai giá trị của cường độ điện trường là 210 và 240 kV/mm, mà tại hai giá trị này, tín hiệu EL có nghĩa (lớn hơn mức nhiễu) không được và được quan sát thấy.



Hình 6. Quá trình quá độ của sự phát quang của vật liệu PEN tại 25°C dưới tác dụng của các điện trường 210 và 240 kV/mm

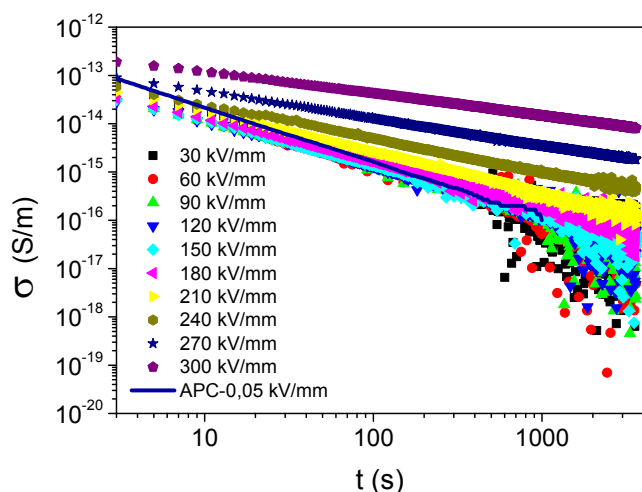
Với tín hiệu EL ở 25°C và 210kV/mm, quá trình quá độ của sự phát quang được quan sát ở rất ngắn (200s đầu), sau đó tín hiệu giảm xuống dưới mức nhiễu của phép đo. Tín hiệu EL ở 25°C và 240kV/mm là tín hiệu có nghĩa ngay cả ở thời gian dài, sau khi sự phát quang giảm nhanh ở khoảng 300s đầu, đường đặc tính EL - thời gian đạt giá trị xác lập lớn hơn rất nhiều so với mức nhiễu của phép đo. Như vậy ở 25°C, ta có thể xác định giá trị của điện trường ngưỡng là 210kV/mm.

Tín hiệu EL có nghĩa được giải thích là kết quả của sự kết hợp giữa các điện tích trái dấu bên trong điện môi [16]. Tín hiệu này không được tìm thấy trước điện trường ngưỡng do trong lòng điện môi không tồn tại khu vực mà các điện tích dương và âm liên kết với nhau [5].

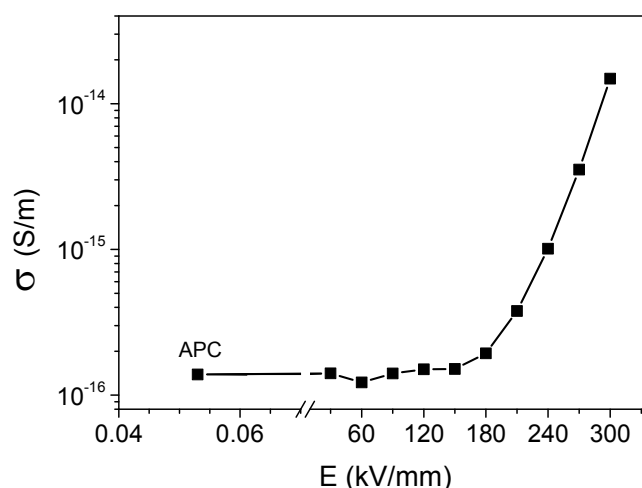
3.4. Phân tích hiện tượng phân cực và dẫn điện tại điện trường thấp và cao

Dòng điện phân cực I tỷ lệ thuận với cường độ điện trường E đặt lên hai cực của vật liệu cách điện. Như vậy dòng điện phân cực chuẩn hóa (I/E) không phụ thuộc vào cường độ điện trường E. Từ ý tưởng trên, chúng tôi đi so sánh dòng điện chuẩn hóa (điện dẫn suất) của vật liệu PEN khi vật mẫu đặt dưới các giá trị thấp và cao của điện trường. Nếu điện dẫn suất quan sát được ở những điện trường cao nào đó lớn hơn điện dẫn suất quan sát được ở những điện trường thấp hơn, ta có thể kết luận rằng, hiện tượng dẫn điện giữ vai trò chủ đạo trong vật liệu PEN ở những điện trường đó.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi lựa chọn giới thiệu trên hình 7 và 8 các so sánh về điện dẫn suất ở 25°C tại những điện trường khác nhau, từ 0,05 đến 300kV/mm. Ở đây, chúng ta quan sát thấy hai đặc tính khác nhau. Ở những điện trường thấp hơn 180kV/mm, những đường đặc tính điện dẫn-thời gian gần như trùng nhau (hình 7), hay giá trị của điện dẫn suất tại thời điểm 1000s gần bằng nhau (hình 8). Ngược lại, với những điện trường cao hơn 180kV/mm, điện dẫn suất lớn hơn khi cường độ điện trường lớn hơn.



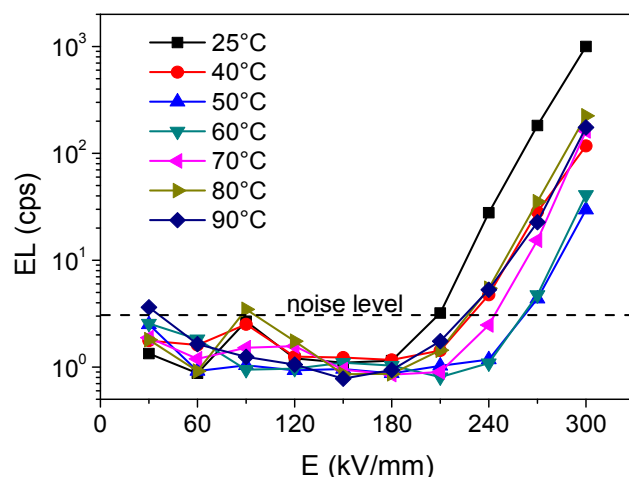
Hình 7. Điện dẫn suất đo ở điện trường thấp và cao tại 25°C



Hình 8. Điện dẫn suất theo điện trường tại 25°C: các giá trị được xác định tại thời điểm 1000s từ các đường đặc tính điện dẫn-thời gian trong hình 7

Dòng điện đo được ở nhiệt độ 25°C và điện trường yếu 0,05kV/mm theo phương pháp APC do quá trình phân cực gây ra. Dòng điện chuẩn hóa (điện dẫn suất) đo được ở những điện trường nhỏ hơn 180kV/mm gần như trùng với dòng điện chuẩn hóa nhận được bằng phương pháp APC và những dòng điện này có thể được sinh ra bởi sự chủ đạo của quá trình phân cực. Với những dòng điện đo được ở điện trường lớn hơn, chúng có thể được sinh ra bởi cả hai quá trình phân cực và dẫn điện, trong đó dòng điện thuận dẫn điện có thể được tách ra từ dòng điện tổng đo được bằng cách trừ đi dòng điện phân cực nhận được bằng phương pháp APC.

Sự xuất hiện của các điện tích không gian trong lòng khối điện môi hay sự xuất hiện của quá trình dẫn điện có thể được xác định bởi sự biến đổi của các tín hiệu EL theo điện trường. Hình 9 giới thiệu sự biến đổi của tín hiệu EL theo điện trường tại những nhiệt độ khác nhau. Giá trị EL tại mỗi điểm trên hình vẽ là trung bình cộng của tất cả các giá trị của tín hiệu EL đo được trong 1 phút cuối của đường đặc tính EL-thời gian. Mức nhiễu của phép đo được lấy là 3cps.



Hình 9. Điện phát quang theo điện trường tại những nhiệt độ khác nhau

Ta thấy trên hình 9, những tín hiệu EL có nghĩa được quan sát thấy sau điện trường ngưỡng, khoảng từ 210 đến 240 kV/mm đối với tất cả các nhiệt độ. Từ giá trị của điện trường ngưỡng này, các điện tích trái dấu trong khối điện môi kết hợp với nhau và giải phóng năng lượng dưới dạng quang năng (photon) hay quá trình dẫn điện lúc này đóng vai trò chủ đạo trong vật liệu cách điện PEN.

4. KẾT LUẬN

Quá trình phân cực và dẫn điện xảy ra đồng thời khi vật liệu cách điện PEN đặt dưới một điện trường nhất định. Tuy nhiên, tùy theo mức độ mạnh yếu của điện trường và ứng suất về nhiệt độ mà một trong hai quá trình này có thể giữ vai trò chủ đạo, thể hiện qua dòng điện tổng được cấu thành chủ yếu bởi dòng điện phân cực hay dòng điện dẫn. Các phương pháp thực nghiệm đã được sử dụng, như phép đo APC, dòng điện ở điện trường cao và điện phát quang, giúp chúng ta có thể kết luận được: ở điện trường thấp, quá trình phân cực giữ vai trò chủ đạo; ở điện trường cao, quá trình phân cực và dẫn điện diễn ra song song trong đó quá trình dẫn điện giữ vai trò chủ đạo ở thời gian dài. Ở đây, cần lưu ý rằng, ranh giới giữa điện trường thấp/cao (yếu/mạnh) phụ thuộc vào nhiệt độ và có giá trị thấp khi nhiệt độ cao. Quá trình dẫn điện gắn liền với sự hình thành của các điện tích không gian trong khối điện môi. Sự kết hợp giữa các điện tích trái dấu được quan sát thấy từ những điện trường ngưỡng, khoảng 210 đến 240kV/mm. Tuy nhiên quá trình dẫn điện có thể xảy ra trước các điện trường ngưỡng này khi các điện tích được phun vào khối điện môi trước đó gần như chỉ mang một dấu nhất định [17].

Những nghiên cứu sau, chúng tôi có thể trích dòng điện thuần dẫn từ các kết quả thực nghiệm trên qua đó giúp xác định các thông số vi mô của vật liệu PEN khi tham chiếu với mô hình điện tích không gian trong vật liệu cách điện rắn [5].

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi trân trọng cảm ơn công ty DuPont Teijin Films đã cung cấp vật liệu PEN và phòng thí nghiệm Laplace, Toulouse, CH Pháp đã giúp chúng tôi thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. C.G. Garton, 1974. *Charge transfer from metal to dielectric by contact potential*. Journal of Physics D: Applied Physics, 7, 1814-1823.
- [2]. D.K.D. Gupta and K. Joyner, 1976. *On the nature of absorption currents in polyethyleneterephthalate (PET)*. Journal of Physics D: Applied Physics, 9, 829-840.
- [3]. N. Saidi-Amroun, S. Berdous and M. Bendaoud, 2004. *Measured and simulated transient current in polyethylene terephthalate films below and above the glass transition temperature*. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), Toulouse, France. 1, 137-140.
- [4]. S. Le Roy, G. Teyssedre, C. Laurent, G.C. Montanari and F. Palmieri, 2006. *Description of charge transport in polyethylene using a fluid model with a constant mobility: fitting model and experiments*. Journal of Physics D: Applied Physics, 39, 1427-1436.
- [5]. G. Teyssedre, C. Laurent, G.C. Montanari, F. Palmieri, A. See, L.A. Dissado and J.C. Fothergill, 2001. *Charge distribution and electroluminescence in cross-linked polyethylene under dc field*. Journal of Physics D: Applied Physics, 34, 2830-2844.
- [6]. R. Eveson, W.A. MacDonald, D. MacKerron, A. Hodgson, R. Adam, K. Rakos, K. Rollins, R. Rustin, M.K. Looney, J. Stewart, M. Asai and K. Hashimoto, 2008. *Optimising Polyester Films for Flexible Electronic Applications*. SID Int. Symp. Dig. Tech. Papers, 39, 1431-1434.
- [7]. C. Escribe-Filippini, R. Tobazéon and J.C. Filippini, 2001. *Conduction characterization of polymer films using the alternate square wave method*. 7th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven, Netherlands. 315-318.
- [8]. V. Adamec and J.H. Calderwood, 1981. *On the determination of electrical conductivity in polyethylene*. J. Phys. D: Appl. Phys., 14, 1487-1494.
- [9]. W.W. Piper and F.E. Williams, 1955. *Theory of Electroluminescence*. Physical Review, 98, 1809-1813.
- [10]. J.J. O'Dwyer, 1973. *The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics*. Clarendon Press, Oxford.
- [11]. L.A. Dissado and J.C. Fothergill, 1992. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. Peter Peregrinus Ltd., London.
- [12]. M-Q. Hoang, S. Le Roy, L. Boudou and G. Teyssedre, 2016. *Implementation of polarization processes in a charge transport model applied on poly(ethylene naphthalate) films*. J. Appl. Phys., 119, 224105-1-8.
- [13]. S. Pelissou, H. St-Onge and M.R. Wertheimer, 1988. *Electrical conduction of polyethylene below and above its melting point*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 23, 325-333.
- [14]. T. Mizutani, M. Ieda and I.B. Jordan, 1979. *Anomalous Transient Currents in High-Density Polyethylene around 50-70°C*. Japanese Journal of Applied Physics, 18, 65-70.
- [15]. N. Saidi-Amroun, H. Oubouchou, S. Berdous, M. Saidi and M. Bendaoud, 2006. *Temperature Effect on Transient Charge and Discharge Currents in Poly(Ethylene Naphthalene-2,6-dicarboxylate)*. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 11, 159-169.
- [16]. J.L. Augé, G. Teyssedre, C. Laurent, T. Ditchi and S. Holé, 2000. *Combined electroluminescence and charge profile measurements in poly(ethylene-2,6-naphthalate) under a dc field*. Journal of Physics D: Applied Physics, 33, 3129-3138.
- [17]. M-Q. Hoang, L. Boudou, S. Le Roy, and G. Teyssedre, 2014. *Dissociating space charge processes from orientation polarization in poly(ethylenenaphthalate) films*. Journal of Physics D: Applied Physics, 47, 455306.