

## مطالعه ترابرد حفره ها در نیم رساناهای آلی با روش زمان پرواز الکترونیکی

علی محمودلو<sup>۱</sup><sup>۱</sup>گروه آموزش فیزیک، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵ تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله، ما روش زمان پرواز یک بسته بار را مورد استفاده قرار داده ایم، که توسط یک پالس ولتاژ سرعت سوق و تحرک پذیری حفره ها را در نیم رساناهای آلی محاسبه کرده ایم. این تکنیک شامل اعمال یک ولتاژ به آند و محاسبه تاخیر زمانی تزریق حاملین بار به الکتروود دیگر می باشد. این روش روش ساده ای برای بررسی خواص ترابرد بار در نیم رساناهای آلی می باشد. ما در این قسمت تحت تاثیر ولتاژهای مختلف در دمای اتاق با استفاده از روش زمان پرواز تحرک پذیری حفره ها را با اعمال مدل شعر-مونترال در نیم رساناهای آلی محاسبه کرده ایم، همچنین تاثیر میدان الکتریکی بر روی تحرک پذیری در دو ولتاژ ۱۰۰ ولت و ۵۰ ولت برای آرایش زمان پرواز بررسی شد و مشاهده گردید که تحرک پذیری حفره در ۱۰۰ ولت نسبت به سایر ولتاژها را دارد. تحرک پذیری حفره، که در ولتاژهای مختلف در دمای اتاق بررسی شد بهترین و مناسب ترین تحرک پذیری برای حفره در نیم رساناهای آلی برابر با که مربوط به ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت به نمونه است، می باشد.

واژگان کلیدی: روش زمان پرواز، نیم رساناهای آلی، تحرک پذیری حفره

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۲۴

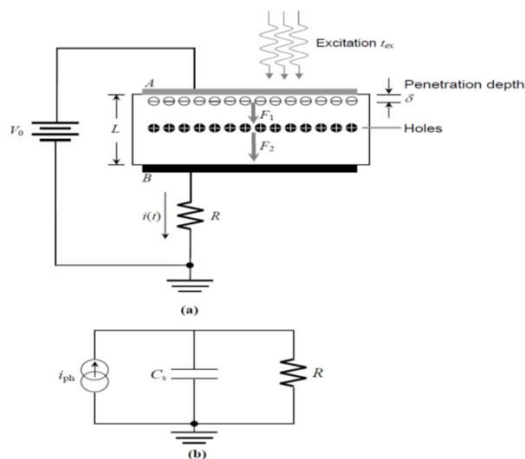
تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۹/۲۸

شاپای چاپی: 2588-493x  
شاپای الکترونیکی: 2588-4921\* نویسنده مسئول  
[a.mahmoodlou@cfu.ac.ir](mailto:a.mahmoodlou@cfu.ac.ir)

### مقدمه

در نیم رسانای آلی توسط محاسبه اندازه گیری سرعت حاملین بار و در نهایت محاسبه تحرک پذیری حاملین بار در این مواد می باشد. حاملین بار در داخل نیم رسانای آلی در پاسخ به اعمال میدان الکتریکی حرکت می کنند. میدان الکتریکی با اعمال ولتاژ بایاس در بین دو اتصال آند و کاتد ایجاد می شود که کاتد به زمین متصل است. اتصالی که در پتانسیل بالا قرار گرفته است، از آن اتصال حاملین بار تزریق می شوند. این اتصال از دو جهت حائز اهمیت است، یکی اینکه به برقراری میدان الکتریکی کمک می کند و دیگری این که

مدارهای الکترونیکی مبتنی بر مواد آلی و پلیمری به دلیل ارزان قیمت بودن و سطح زیاد و همچنین داری خاصیت انعطاف پذیری آنها، دارای کاربردهای ویژه ای می باشند. در بیشتر مطالعات انجام یافته در زمینه ترابرد بار، روش زمان پرواز برای محاسبه اندازه گیری تحرک پذیری دارای بیشترین کاربرد بوده است. روش زمان پرواز مناسبتری روش در اندازه گیری های وابسته به دما و میدان الکتریکی برای تحرک پذیری بوده است. هدف این روش برای مطالعه ترابرد



شکل (۱): توصیف ساده تکنیک رسانش نوری TOF و مدار معادل تکنیک TOF

یک پالس تابشی کوتاه قوی توسط الکتروده A جذب می شود و یک ورقه نازکی از زوج الکترون-حفره در نزدیکی سطح نمونه ایجاد می شود. طول موج تابش طوری انتخاب می شود که ضخامت جذب  $\delta$  ناشی از برانگیزش در مقایسه با ضخامت  $L$  کوچکتر باشد. برای بایاس شکل (۱) الکترون های تولید شده از نور بلافاصله توسط الکتروده A جمع آوری می شوند. حفره ها در طول نمونه تحت تاثیر میدان الکتریکی بطرف الکتروده پایینی سوق می یابند و جریان نوری در مقاومت نمونه  $R$  القا می شود. از شکل پالس جریان القایی، اطلاعات مربوط به ترابرد حاملین، تله شدن حاملین و رها شدن از تله می تواند تعیین شود. ترابرد الکترون نیز می تواند به سادگی توسط اعمال ولتاژ با بایاس معکوس تعیین شود.

پیش شرط های لازم برای آزمایشهای TOF که باید بصورت پایدار برقرار باشد در زیر بیان می شود:

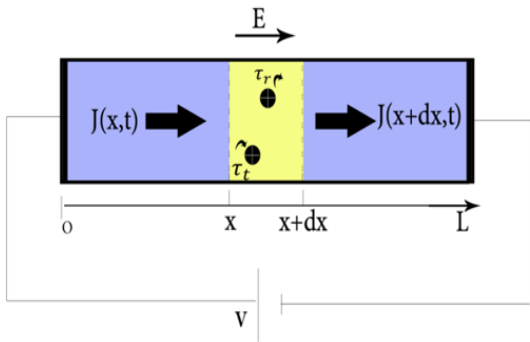
- ۱- ضخامت جذب تابش فرودی باید بطور قابل توجهی کمتر از ضخامت نمونه باشد  $\delta \ll L$ .
- ۲- دوام برانگیزش ( $i_{ex}$ ) باید در مقایسه با زمان گذر حاملین کمتر باشد  $t_{ex} \ll t_T$ .

نقطه تزریق می باشد. الکتروده دیگری از طریق یک مقاومت به زمین متصل است، بطوریکه جریان خروجی ناشی از حامل ایجاد ولتاژ می کند که می تواند برای تشخیص زمان گذر مورد استفاده قرار گیرد [1].

## ۱- تئوری

خواص ترابرد حاملین بار برای نیم رساناهای آلی بستگی به حضور و نحوه توزیع سایت های تله دارد. بطوریکه می دانیم تله ها نتیجه بی نظمی در مولکول ها و زنجیره های پلیمری که ناشی از ناخالصی های فیزیکی یا شیمیایی موجود در ساختار نیم رساناهای آلی می باشد. از نقطه نظر نقص های کریستالی که باعث تغییر در ترازهای انرژی می شوند و ایجاد گاف انرژی در نظریه نواری می شوند، خواص ترابرد حاملین بار در این نوع سیستم ها نیز دستخوش تغییراتی خواهد شد که مهمترین پارامتر در این موضوع جایگزیده شدن و یا دچار تله شدن در فرایند رسانش خواهد بود. البته نقص ها می توانند در نقش مراکز پراکننده در سیستم باشند. روش زمان پرواز در حال حاضر برای آزمایشات تحرک پذیری سوقی کاربردهای وسیعی دارد. مفاهیم مهم در تکنیک TOF جریان گذرا و رسانش نوری گذرا می باشند. طرح ساده آرایش تجربی TOF در شکل (۱) توصیف شده است [2].

یک لایه نازک از ماده با مقاومت زیاد و ضخامت  $L$  در بین دو الکتروده A و B فشرده می شود. الکتروده های A و B الکتروده های مسدود کننده هستند، که به منظور جلوگیری از تزریق بار از الکتروده ها به داخل نمونه مورد استفاده قرار می گیرد. الکتروده های بالایی، A، متصل به منبع ولتاژ  $V_0$  است که یک میدان الکتریکی یکنواخت در طول نمونه ایجاد می کند. الکتروده پایینی B توسط مقاومت الکتریکی  $R$  به زمین متصل است.



شکل (۲): فرایندهای فلوی جریان، تله گیری و رهاسازی در نیم

رسانای آلی با یک تله

تعداد حفره ها در این بره ممکن است به علت افزایش فلوی خالص حفره ها، و یاتوسط رهاسازی گرمایی خالص حاملین بار از تله ها در داخل بره افزایش یابد. اثر باز ترکیب می تواند در داخل بره صرفنظر شود. نرخ تغییر تعداد حفره های آزاد، توسط رابطه زیر بیان می شود [6]:

$$(۲) \quad \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial P_i(x,t)}{\partial t}$$

که  $e$  بار الکترون،  $P(x,t)$  تراکم حفره های آزاد در داخل نمونه،  $J(x,t)$  چگالی جریان خالص در بره و  $P_i(x,t)$  تراکم حفره های تله شده است. چگالی جریان  $J(x,t)$  شامل دو مولفه است، یکی جریان سوقی حاملین بار تحت تاثیر ولتاژ بایاس اعمالی، و دیگری نتیجه پخش حاملین بار. چگالی جریان رسانش برای حفره ها از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$(۳) \quad J_c(x,t) = e\mu_0 p(x,t)E(x,t)$$

شکل بالا طرح مسئله را نشان می دهد. مسئله دو بعدی جبهه موج ولتاژ گذر، یک مسئله پیچیده ای است. با ایجاد شرط اینکه بار در طول قطعه توسط ولتاژ اعمالی کنترل می شود، ما در این شرایط مسئله را به دو معادله دیفرانسیل مستقل کاهش می دهیم. این فرض بادر نظر گرفتن این واقعیت، که در هر نقطه در طول قطعه میدان الکتریکی عمود بر طول قطعه است، صدق می کند. تراکم بار که توسط قانون گاوس به میدان الکتریکی وابسته است

۳- زمان گذر حاملین بار در داخل نمونه در مقایسه با زمان واهلش دی الکتریک  $\tau_{relax}$  نمونه کوچکتر باشد  $t_T \ll \tau_{relax}$   
 ۴- شرایط سیگنال کوچک باید در طول فرایند آزمایش در داخل نمونه حفظ شود.

همانطوری که در پیش شرط ها ذکر شد، فوتون های تابشی باید در نزدیکی سطح الکتروود جذب شود و زوج الکترون-حفره در مجاورت الکتروود بالایی ایجاد شود [3و4].

## ۲- مدل و شبیه سازی

مسئله با بدست آوردن وابستگی زمانی توزیع حاملین  $\rho(x,t)$  که در داخل نمونه در پاسخ به ولتاژ اعمالی  $V(x=0,t)$  به آرایش TOF، که شامل الکتروود آند ( $x=0$ ) و الکتروود کاتد ( $x=L$ ) که متصل به زمین است، سروکار دارد. شکل موج  $V(x=0,t)$  بصورت تابع پله ای  $U(t)$  در نظر گرفته می شود [5].

$$(۱) \quad V(x=0,t) = V.U(t)$$

$$V(x=L,t) = 0$$

همانطوریکه می دانیم تراکم زیادی از حالت های جایگزیده در گاف تحرک پذیری در نیم رساناهای آلی وجود دارند که تاثیر زیادی بر جنبش حاملین بار دارند، توزیع نسبی این حالت های جایگزیده پارامتر مهمی در مطالعه ترابرد حاملین بار به شمار می آید. حالت های جایگزیده برای حاملین آزاد در باند ترابرد مانند مراکز تسخیر عمل می کنند. در این قسمت، تئوری گذر محدود به تله برای حالت های مربوط به توزیع تک تله ای مطالعه می شود.

برای این کار، لایه نیم رسانای آلی بصورت بره محدود به ضخامت  $dx$  در نظر می گیریم. شکل (۲)

در حالیکه تراکم حفره تزریق شده خیلی بیشتر از تراکم الکترون می باشد، در اینصورت می توان تراکم کل بار را فقط حفره در نظر گرفت. از فرم انتگرالی قانون پواسون که همان قانون گاوس می باشد :

$$\oint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q = \rho A \quad (9)$$

برای یک قطعه مطابق شکل فوق، مولفه  $x$  میدان الکتریکی نسبت به مولفه  $y$  میدان الکتریکی می تواند صرفنظر شود. بنابراین این می توان نوشت [13,12,11]:

$$\begin{aligned} E_y &\gg E_x \\ \vec{E} &= E_y \hat{y} \end{aligned} \quad (10)$$

$$E_y = \frac{eP}{\epsilon_{0x}}$$

مولفه  $y$  میدان الکتریکی در این حالت بصورت زیر خواهد بود:

$$E_y = \frac{V_0 - V(x,t)}{L} \quad (11)$$

بنابراین تراکم بار بر حسب ولتاژ عبارت خواهد بود از:

$$\rho = eP(x,t) = e\epsilon_0\epsilon_s \cdot \frac{V_0 - V(x,t)}{L} \quad (12)$$

با جایگذاری  $P$  در معادله (4) معادله دیفرانسیل سیستم بدست می آید [8 و 14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \cdot (V_0 - V(x,t)) \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{\partial (V_0 - V(x,t))}{\partial t} \quad (13)$$

با قراردادن  $V' = V_0 - V(x,t)$  معادله فوق بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \cdot V' \cdot \frac{\partial V'}{\partial x} \right) = \frac{\partial V'}{\partial t} \quad (14)$$

$$V' \frac{\partial^2 V'}{\partial x^2} + \left( \frac{\partial V'}{\partial x} \right)^2 - \frac{1}{\mu} \frac{\partial V'}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

بنابراین چگالی بار می تواند بصورت ورقه ای که از یک نقطه به نقطه دیگر جابجا می شود، بیان شود.

معادله پیوستگی می تواند بصورت زیر بیان شود [7 و 6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0 \\ \rho &= ep(x,t) \end{aligned} \quad (4)$$

با حذف  $\rho$  از دو معادله بالا، می توان نوشت:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = - \frac{e \partial p}{\partial t} \quad (5)$$

جریان، به علت اینکه تحرک پذیری الکترون ها خیلی کمتر از حفره ها می باشد، عمدتاً توسط حفره ها انجام می شود. همچنین مرتبه عددی مولفه سوق جریان حفره ها از پخش آنها زیاد می باشد. این عوامل باعث می شود که معادله جریان بصورت زیر بیان شود [9,10]:

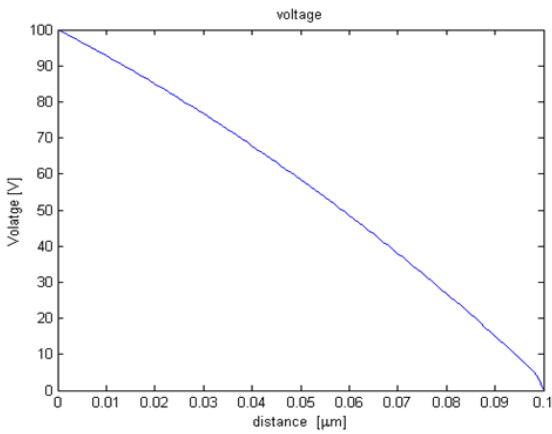
$$\begin{aligned} J &= J_N + J_P \\ J_P &\gg J_N \\ J &\cong J_P \\ J_P &= -\mu ep \frac{\partial V}{\partial x} - eD_p \frac{\partial p}{\partial x} \\ J_{P,Drift} &\gg J_{P,Diffusion} \\ J &= J_P = -\mu ep \frac{\partial V}{\partial x} \end{aligned} \quad (6)$$

با حذف  $J$  از دو معادله (5) و (6) معادله زیر را بدست می آوریم:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \cdot p \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (7)$$

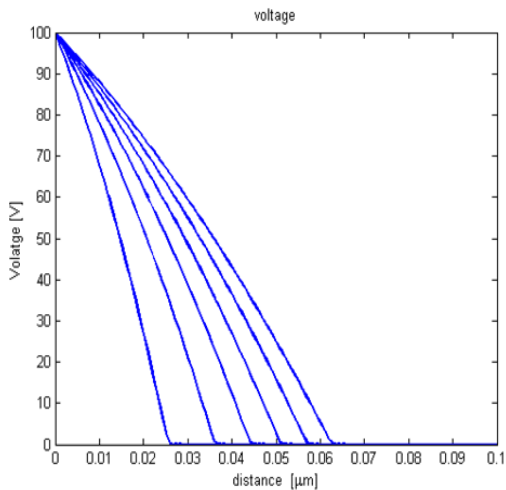
بار الکتریک قطعه توسط معادله پواسون بیان می شود:

$$\begin{aligned} \nabla^2 V &= \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_s} \\ \rho &= e(P - n) \\ P &\gg n \\ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} &= \frac{ep}{\epsilon_0 \epsilon_s} \end{aligned} \quad (8)$$



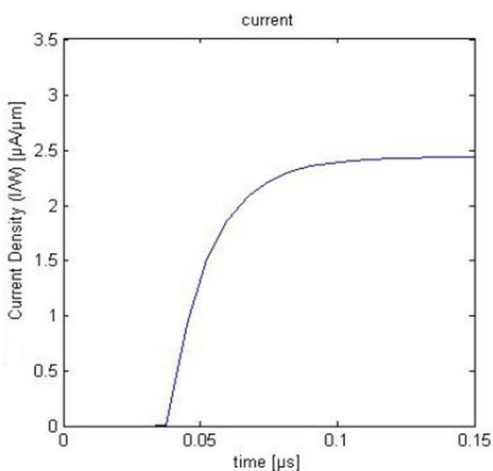
شکل (۳-الف): نمودار ولتاژ بر حسب طول نمونه برای یک ولتاژ

پالسی



شکل (۳-ب): توزیع ولتاژ در طول نمونه در فواصل زمانی ۱۰ نانو

ثانیه برای ولتاژ پالسی



شکل (۴): جریان گذرنده از نمونه بر حسب زمان

معادله فوق معادله ترابرد برای مسئله ولتاژ پالس می باشد [۱۵ و ۱۶]. برای حل معادله دیفرانسیل ترابرد، با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر از روش تفاضل‌های محدود استفاده می‌کنیم.

$$\begin{aligned} V(0, t) &= V.U(t) \\ V(L, t) &= 0 \end{aligned} \quad (۱۶)$$

معادلات بیان شده یک روش حل تقریبی بار مسئله محاسبه تحرک پذیری به روش ولتاژ پالسی برای مدل زمان پرواز الکترونیکی می باشد. این روش برای درک دینامیک ترابرد و همچنین برای بدست آوردن پارامترهای موثر در ترابرد حاملین بار در نیم رساناهای آلی مفید است. با این وجود برای درک کامل این مسئله نیاز به حل دقیق و پیدا کردن پارامترهای اساسی می باشد [۱۷].

### ۳- بحث و نتایج

در بررسی نتایج مسئله، یک زمان با مقدار محدود برای حالتی که جریان سیستم صفر می باشد، وجود دارد. تاخیر زمانی نسبت معکوس با تحرک پذیری لایه ماده آلی دارد. معکوس زمان تاخیری از مشخصه‌های فرکانس قطعات الکترونیک مواد آلی می باشد که پارامتر مهمی به شمار می آید.

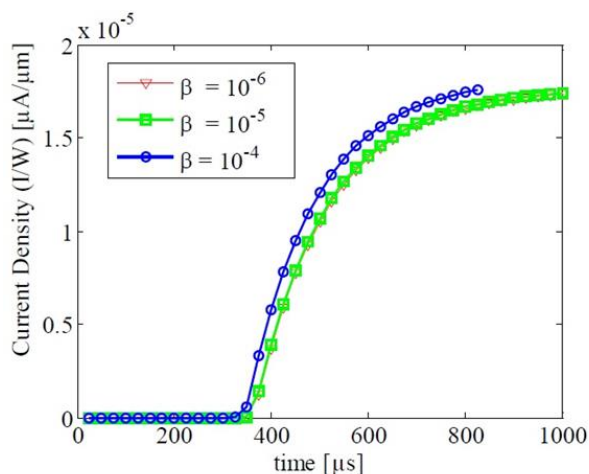
در شکل (۳) که شبیه سازی برای ولتاژ پالسی ایده آل انجام شده است. طول نمونه ۱۰۰ نانومتر و تحرک پذیری آن و ولتاژ اعمالی بر نمونه ۱۰ ولت در نظر گرفته شده است. در نمودار شکل a توزیع یک ولتاژ ایده آل بر نمونه و در شکل b توزیع ولتاژ در طول نمونه در فواصل زمانی ۱۰ نانوثانیه و در شکل c نیز جریان بر حسب زمان برای نمونه رسم شده است. تحرک پذیری ثابت، نیم رسانا بدون تله و اتصالات ایده آل فرض شده است. در واقع شرایط ایده آل برای هیچ سیستمی وجود ندارد. زیرا اولاً "مقداری زمان محدود برای اینکه پالس به بیشترین مقدار خود برسد، وجود دارد، ثانیاً "تحرک پذیری یک نیم رسانای آلی وابسته به تغییرات شرایط میدان موضعی می باشد و ثالثاً "تله در نیم رساناهای آلی بطور کامل بر ترابرد حاملین بار غلبه می کنند.

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{\beta\sqrt{E} - \Delta}{kT}\right) \quad (18)$$

که  $k$  ضریب ثابت بولتزمن،  $T$  دما،  $E$  میدان الکتریکی،  $\Delta$  سد پرش حاملین بار در میدان صفر،  $\mu_0$  تحرک پذیری ذاتی بدون سد پرش و  $\beta$  ضریب وابستگی به میدان می باشد. مقدار  $\beta$  در حدود  $10^{-5} - 10^{-4} \text{ eV}/(\text{V}/\text{cm})^{1/2}$  با اعمال رابطه وابستگی ترابرد، معادله ترابرد در این سیستم بصورت زیر تغییر می کند:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_0 \exp\left(\frac{\beta\left(\frac{\partial V'}{\partial x}\right)^{1/2}}{kT}\right) \cdot V' \cdot \frac{\partial V'}{\partial x} \right) = \frac{\partial V'}{\partial t} \quad (19)$$

شبهه سازی ما در دمای اتاق و ضریب  $\beta$  در فاصله  $10^{-6} - 10^{-4} \text{ eV}/(\text{V}/\text{cm})^{1/2}$  انجام گرفته است که نتیجه آن در شکل (۳-۱۶) ارائه شده است و همچنین طول نمونه ۱۰۰ نانومتر و تحرک پذیری آن  $\mu = 0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  و ولتاژ اعمالی بر نمونه ۱۰ ولت در نظر گرفته شده است.



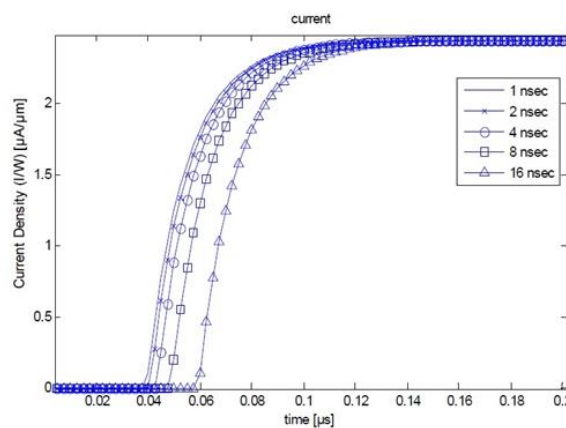
شکل (۳): وابستگی میدان الکتریکی بر تحرک پذیری در دمای اتاق

با در نظر گرفتن یک خیز خطی از صفر تا بیشترین مقدار  $V_0$  پالس ولتاژ ما پاسخ گذرا را برای این مسئله شبیه سازی نموده ایم. شکل ۴ اثر زمان خیز محدود بر روی تاخیر اولیه را نشان می دهد. همانطوریکه از شکل ملاحظه می شود جابجایی زمان خیز با افزایش زمان بطور کامل مشهود است و مقدار جابجایی برابر با نصف زمان خیز می باشد. بنابر این برای کامل کردن رابطه تحرک پذیری نیاز به روابط زیر می باشد:

$$t_{Delay}^{Ramped} = t_{Delay}^{unramped} + \frac{T_{ramp}}{2} \quad (17)$$

$$t_{Delay}^{unramped} = 0.38 \frac{L^2}{\mu V_0}$$

در حالت خیز غیر خطی، نصف زمان خیز می تواند فاکتور تصحیح تقریبی باشد. بطور متناوب زمان تاخیری می تواند از مدت زمانی که طول می کشد تا ولتاژ به نصف ماکزیمم برسد، محاسبه شود. در این قسمت نیز طول نمونه ۱۰۰ نانومتر و تحرک پذیری آن  $\mu = 0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  و ولتاژ اعمالی بر نمونه ۱۰ ولت در نظر گرفته شده است. شکل (۵)



شکل (۵): تاثیر زمان خیز محدود بر تاخیر اولیه

در بررسی مشخصه های ولتاژ-جریان بر حسب دما مشخص شده است که تحرک پذیری نیم رسانای آلی تحت میدان قوی رفتار پول-فرانکل<sup>۱</sup> را از خود نشان می دهد. که بصورت رابطه زیر بیان می شود:

<sup>1</sup> Pool-Frenkel

منحنی آبی رنگ پاسخ گذرا در غیاب تله گیری را نشان می دهد، و طول عمر منحنی های سبز در زیر آنها نوشته شده است. ملاحظه می شود که طول عمرهای بزرگتر و یا مساوی زمان تاخیر، به دلیل اینکه حفره ها قبل از اینکه در تله گیر بیفتند طول نمونه را طی می کنند، در پاسخ قابل اغماض می باشند. با کاهش طول عمر حامل، جریان حالت پایا نیز کاهش می یابد زیرا تعداد حاملین شرکت کننده در رسانش و ترابرد توسط تله گیری کاهش می یابد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر میدان الکتریکی بر روی تحرک پذیری در دو ولتاژ ۱۰۰ ولت و ۵۰ ولت برای آرایش زمان پرواز بررسی شد و مشاهده گردید که تحرک پذیری حفره در ۱۰۰ ولت نسبت به سایر ولتاژها را دارد.

تحرک پذیری حفره، که در ولتاژهای مختلف در دمای اتاق بررسی شد بهترین و مناسب ترین تحرک پذیری برای حفره در نیم رساناهای آلی برابر با که مربوط به ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت به نمونه است، می باشد.

#### منابع

- [1] Kreouzis, T., Poplavskyy, D., Tuladhar, S., Nelson J., Campbell A.J. Temperature and field dependence of hole mobility in poly(9,9-dioctylfluorene). *Phys.Rev. B.* 73(2), 801-809 (2016).
- [2] Majewski, L. A., Schroeder, R., Voigt, M., Grell, M. Low voltage organic transistors on a polymer. *J. Phys. D.* 37(7), 337-347,(2014).
- [3] Majewski, L. A., Schroeder, R., Grell, M., Turner, M. L. J. High capacitance organic field – effect transistors with

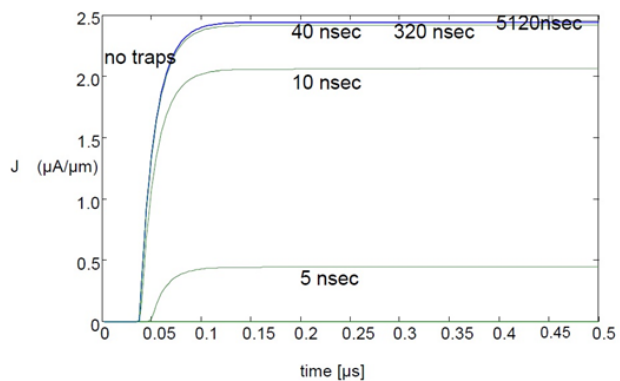
بطوریکه آشکار است تاخیر اولیه موثر واقع نشده است اگرچه تغییرات وابستگی میدان در نظر گرفته شده است. این هم به این دلیل است که شبیه سازی در دمای اتاق صورت گرفته است که به علت دمای پایین این اثر خیلی ناچیز می باشد. میدان الکتریکی هم برای این نوع تغییرات به اندازه کافی بالا نیست. بنابراین زمان تاخیری توسط تحرک پذیری میدان صفر باید در نظر گرفته شود. شکل (۶)

نقص ها و ناخالصی ها، که جایگزیدگی حاملین بار را اداره می کنند، نقش مهمی در ترابرد حاملین بار در نیم رساناهای آلی دارند. چگالی حالتها در این نوع نیم رساناها باعث ایجاد گاف ممنوعه در ترازهای انرژی می شود. طبیعت دقیق چگالی حالتها در نیم رسانای آلی هنوز بطور کامل مشخص نیست. تاثیر حالتهای جایگزیده کم کردن سرعت حاملین بار است، بنابراین پاسخ ولتاژ پالسی همچنین می تواند بصورت کم کردن سرعت حاملین در حضور تله ها باشد. ما می توانیم به عنوان یک مدل ساده شامل یک تراز تک تله ای که توسط طول عمر حامل  $\tau$  مشخص می شود را در نظر بگیریم. معادله پیوستگی جریان بصورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\frac{1}{e} \frac{\partial J_p}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial t} = G_p - R_p \quad (20)$$

$$G_p = 0, R_p = \frac{P - P_0}{\tau}$$

که  $P_0$  تراکم ذاتی حفره در نیم رسانا را نشان می دهد. نتیجه شبیه سازی در شکل (۷) بیان شده است.



شکل (۷): تاثیر تله تک تراز بر روی پاسخ گذرای سیستم در دمای اتاق

- [12] Shin, K., Yang, C., Yang, S. Y., Jeon, H. Effect of polymer gate dielectric roughness on pentacene field-effect transistors. *Appl. Phys. Lett.* 88, 072109, 351-362 (2016).
- [13] Andrey, Y., Sosorev, M. Simple charge transport model for efficient search of high-mobility organic semiconductor crystals. *Materials & Design.* 192, 111-119 (2020).
- [14] Veysel Tunc, A., De Sio, A., Riedel, D., Deschler, F., Da Como, E., Parisi, J., von Hauff, E. Molecular doping of low-bandgap-polymer: fullerene solar cells: Effects on transport and solar cells, *Org. Electron.*, 13, 290- 299 (2017).
- [15] Panda, A., Muniz, S. M. Smart home with neural network based object detection, *Big Data and Computing Visions* , 2(1), 40 – 48 (2022).
- [16] Maennig, B., Pfeiffer, M., Nollau, A., Zhou, X., Leo K., Simon, P. Controlled p-type doping of polycrystalline and amorphous organic layers: Self-consistent description of conductivity and field-effect mobility by a microscopic percolation model, *Phys. Rev. B*, 64, 195-208 (2018).
- [17] Osterbacka, R., Pivrikas, A. Effect of 2-D Delocalization on Charge Transport and Recombination in Bulk-Heterojunction Solar Cells, *IEEE in Quantum Electronics*, 16, 1738-1745 (2017).
- modified gate insulator surface. *Appl. Phys.* 96(6), 435–447 (2019).
- [4] Steudel, S., Vusser, S. D., Jonge, S. D., Janssen, D., Verlaak, S. Influence of the dielectric roughness on the performance of pentacene transistors. *Appl. Phys. Lett.* 85, 302-311 (2015).
- [5] Mahmoudloo, A., Ahmadi, S. Variable range hopping transport characteristics of the charge carriers in homogenous amorphous organic semiconductors. *Optik.* 127, 505- 513 (2016).
- [6] Evgeny, L. Pankratov. On increasing of density of field-effect heterotransistors in the framework of a c-multiplier, *Journal of applied research on industrial engineering*, 11(2), 92-118 (2022).
- [7] Schrader, M., Körner, C., Elschner, C., Andrienko, D. Charge transport in amorphous and smectic oligothiophenes. *J. Mater. Chem.* 22, 119-124 (2020).
- [8] Liu, C., Huang, K. A unified understanding of charge transport in organic semiconductors the importance of attenuated delocalization for the carriers. *Materials Horizons.* 4, 233-240 (2017).
- [9] Sari, I. U., Ak, U. Machine efficiency measurement in industry 4.0 using fuzzy data envelopment analysis, *Journal of Fuzzy Extension & Applications*, 3(2), 78-89 (2022).
- [10] Street, R., Northrup, N., Salleo, J. E. Transport in polycrystalline polymer thin – film transistors. *phy. Rev. B* , 71. 16, 337-348 (2013).
- [11] Fritz S. E., Kelley T. W., Frisbie C. D. Effect of dielectric roughness on performance of pentacene TFTs with a polymeric smoothing layer. *J. Phys. Chem.B.* 109, 10574, 708-714 (2019).



## Study of Hole Transport in Organic Semiconductors with Electronic time-of-flight Method

<sup>1</sup> Ali Mahmoudloo

<sup>1\*</sup> Department of Physics Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran

### Article details

Received: 2024/11/21  
Accepted: 2024/12/14  
Published: 2024/12/18

ISSN: 2588-493x  
eISSN: 2588-4821

Correspondence email:  
[a.mahmoodlou@cfu.ac.ir](mailto:a.mahmoodlou@cfu.ac.ir)



### Abstract

In this paper, we have used the time-of-flight method of a charge packet, which has been calculated by a voltage pulse of the drift velocity and mobility of holes in organic semiconductors. This technique involves applying a voltage to the anode and calculating the delay time of the injection of charge carriers to the other electrode. This method is a simple method to investigation the properties of charge transport in organic semiconductors. In this section, under the influence of different voltages at room temperature, using the time-of-flight method, we have calculated the mobility of the holes by applying the Scheer-Montreal model in organic semiconductors, as well as the effect of the electric field on the mobility at two voltages of 100 V and 50V was checked for time-of-flight arrangement and it was observed that the mobility of the hole at 100 volts is higher than other voltages. The mobility of the hole, which was checked at different voltages at room temperature, is the best and most appropriate mobility for the hole in organic semiconductors, which corresponds to the applied voltage of 40 V to the sample.

**Keywords:** time of flight method, organic semiconductors, hole mobility