

## رانش ولتاژ آستانه در ترانزیستور اثر میدانی انتخابی یونی حساس به غلظت یون هیدروژن و رانش درخشندگی در دیود

### نورگسیل آلی: نقش نفوذ پاشنده

شهریار جاماسب<sup>۱</sup>، مجتبی مظاهری<sup>۲</sup>

استادیار دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی همدان، jamasb@hut.ac.ir

استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی همدان

### چکیده

پدیده رانش در ترانزیستور اثر میدانی انتخابی یونی حساس به غلظت یون هیدروژن (حساس به میزان pH) و در دیود نورگسیل آلی منجر به ناپایداری در نقطه کار می شود. در ترانزیستور اثر میدانی انتخابی یونی حساس به میزان pH، رانش به صورت تغییر زمانی یکسویه و کند در ولتاژ آستانه هدایت ترانزیستور، و در نتیجه، تغییر در جریان dc قطعه مشاهده می شود. در دیود نورگسیل آلی، رانش به صورت کاهش درخشندگی قطعه با گذشت زمان ظاهر می شود. رانش نقطه کار در دو قطعه بر اساس سازوکار نفوذ، موسوم به نفوذ پاشنده توصیف می شود که شامل پرش بین حالت های انرژی تله ها می باشد. تغییرات پدیده رانش نسبت به زمان در این دو قطعه مشابه یکدیگر است که ناشی از رفتار مشخصه ضریب نفوذ پاشنده است. این تغییرات نسبت به زمان با قانون توان به صورت  $(t)^{\beta-1}$  بیان می شود؛ که پارامتر  $\beta$  مشخصه نفوذ پاشنده است و در گستره  $0 < \beta < 1$  قرار دارد. در دیود نورگسیل آلی، تبعیت ضریب نفوذ پاشنده از قانون توان منجر به زوال نمایی کشیده درخشندگی می شود. در این مقاله مدلی فیزیکی برای پدیده رانش در دیود نورگسیل آلی ارائه شده است، که تغییرات درخشندگی را با زمان به صورت کمی و با دقتی بالا بیان می کند.

### کلیدواژه

نفوذ پاشنده، رانش، ترانزیستور اثر میدانی انتخابی یونی، دیود نورگسیل آلی، زوال نمایی

### مقدمه

یکسویه در ولتاژ آستانه قطعه در میزان pH ثابت ظاهر می شود. دقت بالای مورد نیاز برای کنترل میزان pH خون، شرایط الزامی سختی را برای نرخ قابل تحمل رانش در آیسفت حساس به pH لازم دارد.

رانش در آیسفت حساس به میزان pH بر اساس سازوکار نفوذ همراه با حرکت پرشی میان ترازهای انرژی تله<sup>۸</sup>، که به نفوذ پاشنده<sup>۹</sup> موسوم است، توصیف می شود [2][3]. پدیده رانش درخشندگی در دیود نورگسیل آلی<sup>۱۰</sup> (OLED) نیز دارای رفتار زمانی مشابهی با رفتار رانش در آیسفت است.

خستین بار، درخشندگی در دیودهای نورگسیل مبتنی بر مولکولهای آلی کوچک توسط تانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران [4] در ۱۹۸۷ گزارش شد و درخشندگی در دیودهای نورگسیل مبتنی بر

نیم قرن از معرفی ترانزیستور اثر میدانی انتخابی یونی حساس به یون<sup>۲</sup> (آیسفت) [1] می گذرد و از آن زمان تا کنون، ناپایداری نقطه کار یا رانش<sup>۳</sup> یک مانع جدی در راه تجاری سازی زیست حسگرهای مبتنی بر آیسفت به شمار می رود. در مقایسه با ترانزیستور اثر میدانی با ساختار فلز-اکسید-نیمه رسانا<sup>۴</sup> (ماسفت)، در آیسفت گیت فلزی وجود ندارد (Error! Reference source not found). در آیسفت حساس به میزان pH<sup>۵</sup>، جذب این یون روی سطح عایق گیت (برای مثال نیتريد سیلیسیم<sup>۶</sup> یا اکسید آلومینیوم<sup>۷</sup>) سبب مدوله شدن رسانایی کانال با تغییرات غلظت یون هیدروژن (pH) می شود. رانش معادل ناپایداری در نقطه کار آیسفت است که به صورت یک تغییر زمانی نسبتا کند و معمولا

<sup>2</sup> Ion-selective Field Effect Transistors (ISFET)

<sup>3</sup> Drift

<sup>4</sup> Metal-oxide-semiconductor Field Effect Transistor

<sup>5</sup> pH-sensitive ISFET

<sup>6</sup> Silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

<sup>7</sup> Aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

<sup>8</sup> Trap energy levels

<sup>9</sup> Dispersive diffusion

<sup>10</sup> Organic Light-Emitting Diode (OLED)

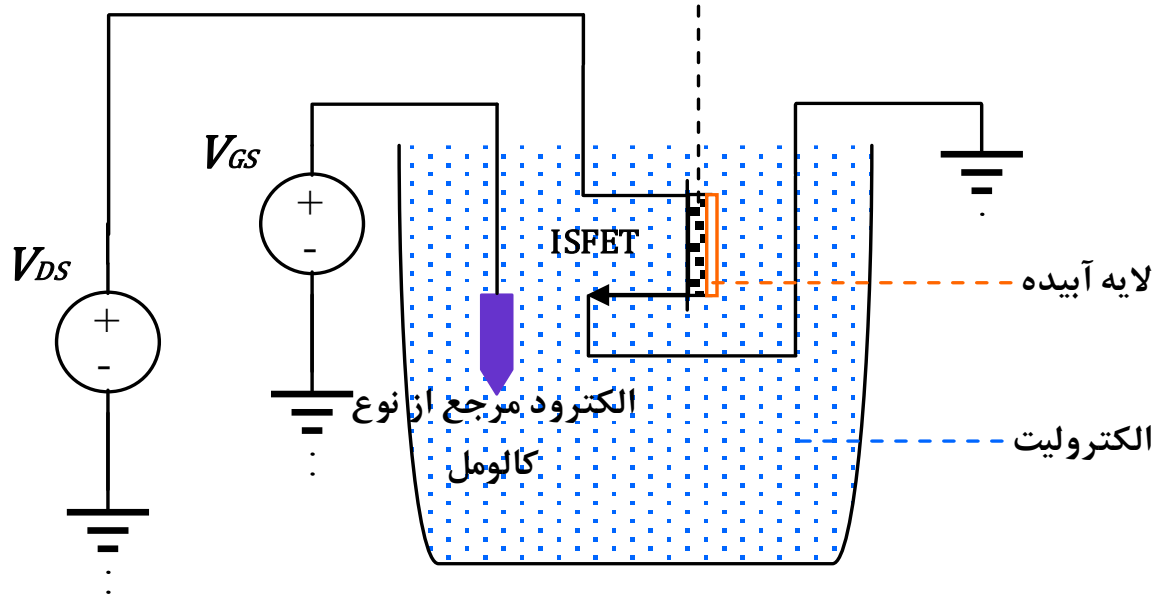
<sup>11</sup> Tang

پایداری بر اساس طول عمر دیود نور گسیل آلی تعریف می شود و مدت زمانی است که در آن درخشندگی تحت شرایط عملکرد مداوم به نصف مقدار اولیه خود کاهش می یابد. در کاربردهای دیود نورگسیل آلی، به خصوص در نمایشگرها، طول عمر بالا یک مزیت عمده محسوب می شود.

پلیمرهای مزدوج توسط باروز<sup>۱۲</sup> و همکاران [5] در ۱۹۹۰ مشاهده شد. از آن زمان تا کنون، شناخت بیشتری از سازوکار حمل جریان در این ادوات به دست آمده است. با این حال، عدم وجود شناخت بنیادی از پدیده رانش درخشندگی در دیودهای نورگسیل آلی، کاربرد این ادوات را محدود ساخته است. رانش در دیود نورگسیل آلی به صورت کاهش نسبتا کند و یکنواخت در درخشندگی با گذشت زمان مشاهده می شود. پایداری یکی از معیارهای مهم در ارزیابی قابلیت اطمینان دیود نورگسیل آلی به شمار می رود.

## لایه حساس به pH از نوع

### نیتريد سيليسيم



شکل ۱: آیسفت با کانال نوع n که در آن ترمینال بدنه ترانزیستور به زمین متصل شده است. ولتاژ گیت به کمک الکتروود مرجع که به الکترولیت اعمال می شود تعیین می شود.

الکترون و حفره (باربر ها) عمل می کنند. همچنین، لایه های الکترون یا  $PMC^{18}$  یا  $DEC^{19}$  لایه های نورگسیل را تشکیل می دهند. مواد آلی مورد استفاده در دیودهای نورگسیل معمولا فاقد آلاینده ها هستند و در دمای اتاق باربر های آزاد ندارند، لذا می توان این مواد را از دیدگاه ویژگی الکتریکی، مواد عایق محسوب کرد. پس از آنکه باربر ها از الکتروود به داخل لایه آلی تزریق می شوند، سازوکار ترابرد بر اساس پخش میان حالت های انرژی عمل می کند. الکترون ها و حفره ها در لایه های حاوی مولکول های کوچک

ساختار دیود نورگسیل آلی [4] شامل چندین لایه آلی است که مطابق **Error! Reference source not found.** میان آند و کاتد قرار می گیرند. الکترون ها و حفره ها به ترتیب توسط کاتد و آند تامین می شوند و پس از ترابرد به لایه گسیل کننده با یکدیگر باز ترکیب<sup>۱۲</sup> می شوند که منجر به تولید نور می شود. در **Error! Reference source not found.** لایه های  $Alq3^{14}$  و  $CuPc^{15}$  به ترتیب نقش لایه های تزریق کننده الکترون و حفره را ایفا می کنند و لایه های  $NPB^{17}$  و  $BCP^{16}$  به ترتیب به عنوان لایه های ترابرد

<sup>17</sup> N,N'-di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-(1,1'-biphenyl) 4,4'-diamine (NPB)

<sup>18</sup> Penta-methyl carbazole

<sup>19</sup> Dimer of N-ethyl carbazole (DEC)

<sup>12</sup> Burroughes

<sup>13</sup> Recombination of carriers

<sup>14</sup> Hydroxyquinoline aluminum (Alq3)

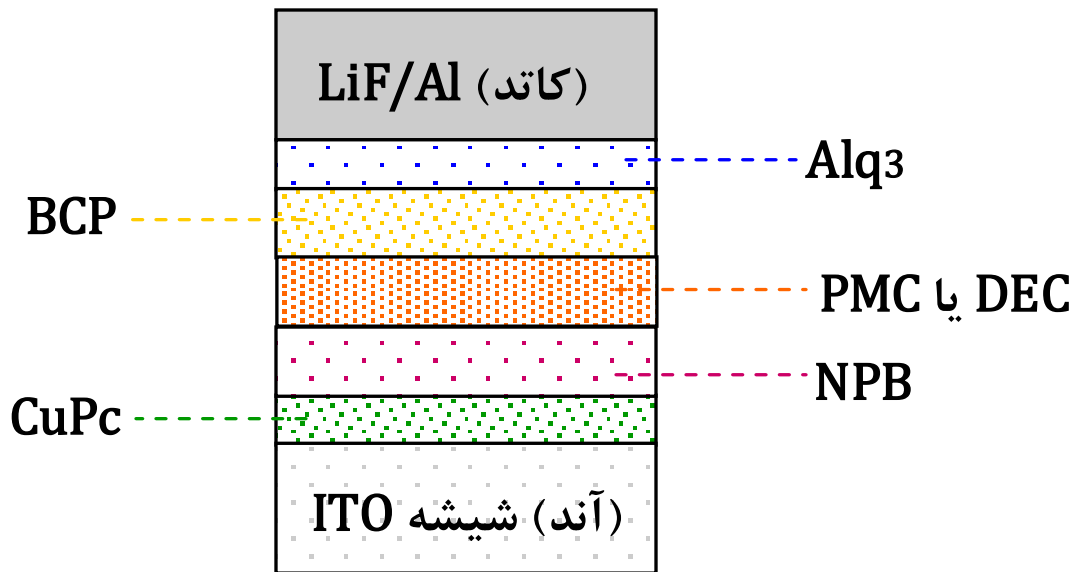
<sup>15</sup> Copper phthalocyanine (CuPc)

<sup>16</sup> Bathocuproine (BCP)

رساناهای کریستالی مرسوم، در نیمه رساناهای آلی که دارای ساختار مولکولی آمورف هستند، سازوکار حمل بار مبتنی بر ترابرد آزاد از طریق حالت‌های انرژی موجود در نوارهای انرژی پیوسته نیست.

تنها قادر به پرش از یک مولکول به مولکول همسایه هستند، در حالی که ترابرد باربرها در پلیمرهای حاوی پیوندهای دوگانه مزدوج را می‌توان بر اساس ترکیبی از حرکت باربرها در راستای اربیتال‌های ناچایگزیده<sup>۲۰</sup> و پرش<sup>۲۱</sup> میان زنجیره‌های پلیمری توصیف کرد [6].

در جامدات آلی ترابرد پرشی به وجود حالت‌های انرژی تله، که به طور نامنظم توزیع شده‌اند، نسبت داده می‌شود [7]. بر خلاف نیمه



شکل ۲: ساختار دیود نورگسیل آلی [۴].

همبستگی قوی میان کاهش شدت درخشندگی و ایجاد تله با بار مثبت از یکسو و تله‌های خنثی برای الکترون در حد واسط لایه‌های Alq3/NPD از سوی دیگر، مطرح شده است [12]. همچنین با در نظر گرفتن تغییرات زمانی مشخصه ظرفیت خازنی برحسب ولتاژ C-V<sup>۲۳</sup> و افزایش ولتاژ راه‌اندازی با گذشت زمان، رانش در دیود نورگسیل آلی بر اساس سازوکار ترابرد محدود شده توسط ترازهای تله توصیف شده است [13].

هر چند تا کنون یک مدل فیزیکی کمی برای رانش درخشندگی در دیودهای نورگسیل آلی مطرح نشده است، مدل‌هایی مبتنی بر پارامترهای تجربی برای فرسودگی<sup>۲۴</sup> حاصل از کاهش درخشندگی قطعه ارائه شده‌اند [14][15][16]. همچنین مدلی برای پیش‌بینی طول عمر قطعه بر مبنای یک مدل پویا در حوزه زمان [17] و مدل‌های آماری برای زوال درخشندگی ارائه شده‌اند [18][19][20]. از میان مدل‌هایی که برای زوال درخشندگی در

ترازهای انرژی تله و ثابت‌های زمانی مربوط به فرآیند تله افتادن و آزاد شدن باربرها نقش عمده‌ای در سازوکار رانش در دیود نورگسیل آلی ایفا می‌کنند. حالت‌های انرژی تله در جامدات آلی همچنین در ترانزیستورهای لایه نازک<sup>۲۲</sup> (TFT) از نوع آلی به عنوان منشاء رانش در بایاس گیت معرفی شده‌اند [8]. اخیراً، پدیده رانش در ترانزیستورهای لایه نازک پلی‌سیلیسیم مورد مطالعه قرار گرفته است [9]. در این ترانزیستورها، تغییرات ولتاژ آستانه با زمان مانند رانش درخشندگی در دیود نورگسیل آلی یک رفتار دو مرحله‌ای دارد [10].

راه‌اندازی دیودهای نورگسیل آلی توسط جریان مستقیم منجر به رانش درخشندگی می‌شود. رانش به نوع مواد مورد استفاده در دیود نورگسیل آلی و توزیع ترازهای انرژی تله در این مواد و همچنین به آرایش لایه‌ها در قطعه بستگی دارد [11]. در دیودهای نورگسیل مبتنی بر لایه‌های آلی NPB و Alq3 وجود یک

<sup>23</sup> Capacitance-voltage

<sup>24</sup> Ageing

<sup>20</sup> Delocalized orbitals

<sup>21</sup> Hopping

<sup>22</sup> Thin film transistor

پاشنده در حضور ترازهای انرژی تله مدل سازی شده است [2]. در جامد های آمورف، نفوذ پاشنده ناشی از حرکت پرشی میان حالت های انرژی موضعی است و منجر به اتلاف زمانی مشخصه در ضریب نفوذ می شود که مطابق رابطه زیر از قانون توان<sup>29</sup> پیروی می کند [22]:

$$D(t) = D_0(\omega_0 t)^{\beta-1} \quad (1)$$

که  $D(t)$  ضریب نفوذ موثر (وابسته به زمان) است،  $D_0$  ضریب نفوذ وابسته به دما را نمایش می دهد که از رابطه آرنیوس پیروی می کند،  $\omega_0$  بیانگر فرکانس تلاش برای پرش است و  $\beta$  پارامتر مشخصه پاشندگی در گستره  $0 < \beta < 1$  است. از دیدگاه فیزیکی، ویژگی نفوذ وابسته به زمان ممکن است از پاشندگی در فاصله بین موقعیت ترازهای انرژی تله که نزدیک ترین همسایه نسبت به یکدیگرند، ناشی شود. از طرف دیگر، منشا وابستگی زمانی فرآیند نفوذ می تواند به دلیل پاشندگی در ترازهای انرژی تله باشد، که منجر به ایجاد گستره ای از زمان های رهایی از تله می شود. در فرآیند نفوذ پاشنده با گذشت زمان، چگالی تله های در دسترس برای حرکت جهشی ماده نفوذ کننده کاهش می یابد. تغییر چگالی حالت های انرژی تله،  $\Delta N_{S/T}(t)$  رفتار زوال نمایی کشیده دارد و به صورت رابطه زیر نوشته می شود [23][22]:

$$\Delta N_{S/T}(t) = \Delta N_{S/T}(0) \exp \left[ - \left( \frac{t}{\tau} \right)^{\beta} \right] \quad (2)$$

که  $\beta$  پارامتر مشخصه نفوذ پاشنده و  $\tau$  ثابت زمانی وابسته به واهلش<sup>30</sup> ساختاری عایق است و مقدار تقریبی آن در محدوده چندین ساعت است.

تغییر شیمیایی تدریجی لایه سطحی حساس به pH در آیسفت باعث تغییر ضخامت لایه عایق می شود و در نتیجه ظرفیت خازنی موثر عایق تغییر می کند. کاهش ظرفیت خازنی موثر عایق با گذر زمان منجر به رانس ولتاژ گیت آیسفت،  $\Delta V_G(t)$  می شود که به صورت زیر نوشته می شود [2]

$$\Delta V_G(t) = -Q_S \left( \frac{\varepsilon_N - \varepsilon_{HL}}{\varepsilon_N \varepsilon_{HL}} \right) x_{HL}(t) \quad (3)$$

که  $Q_S$  چگالی بار الکتریکی نیمه رسانا با رابطه  $Q_S = Q_D + Q_I + Q_{inv}$  بیان می شود. پارامترهای  $Q_D$  و  $Q_{inv}$  به ترتیب چگالی سطحی بار ذخیره شده در لایه تهی نیمه رسانا و بار موجود در لایه وارون هستند و  $Q_I$  چگالی سطحی بار القایی موثر در نیمه رسانا است. در رابطه ۳،  $\varepsilon_N$  ثابت گذردهی  $Si_3N_4$  است و  $\varepsilon_{HL}$  و  $x_{HL}(t)$  به ترتیب ثابت گذردهی و ضخامت لایه فوقانی ناشی از آپیوشی سطح نیتريد را نشان می دهند.

بر اساس قانون اول انتشار فیک<sup>31</sup>، با در نظر گرفتن وابستگی زمانی ضریب نفوذ در فرآیند نفوذ پاشنده مطابق رابطه ۱ و همچنین

دیود نورگسیل آلی به کار گرفته شده اند، مدل زوال نمایی کشیده<sup>25</sup> بهترین برازش را به داده های تجربی درخشندگی بر حسب زمان نمایش می دهد [21]. با توجه به کندی فرآیند رانس درخشندگی و تشابه رفتار زمانی آن به رفتار رانس در آیسفت، می توان حرکت پرشی میان ترازهای انرژی تله تحت تاثیر فرآیند نفوذ پاشنده را به عنوان مبنای ناپایداری در دیود نورگسیل آلی نیز در نظر گرفت.

در این مقاله، مدلی فیزیکی برای رانس در دیود نورگسیل آلی ارائه می شود که تغییرات درخشندگی را با زمان به خوبی توصیف می کند. در این مدل، نرخ زمانی تغییر درخشندگی مانند نرخ زمانی تغییر ولتاژ آستانه در آیسفت بر اساس سازوکار نفوذ پاشنده در حضور ترازهای انرژی تله مدل سازی می شود. همچنین نشان می دهیم که زوال نمایی کشیده درخشندگی در دیود نورگسیل آلی مبنای فیزیکی دارد و از قانون توان تبعیت می کند.

## مدل فیزیکی رانس در آیسفت

در این بخش یک مدل فیزیکی برای توصیف پدیده رانس در آیسفت ارائه می شود که وابستگی زمانی مشخصه ولتاژ آستانه قطعه را بر مبنای فرآیند نفوذ پاشنده توجیه می کند. رانس در در آیسفت حساس به pH، فرآیندی کند است که در طی یک بازه زمانی چندین ساعته رخ می دهد، لذا منطقی است که فرض کنیم این پدیده وابسته به فرآیند نفوذ در عایق گیت باشد. به ویژه چون عایق های گیت غیر آلی متداول سدهای بسیار موثری را در برابر نفوذ تشکیل می دهند، فرآیند نفوذ در آنها با ثابت های زمانی نسبتاً طولانی مشخص می شود. با این حال، مدل نفوذ گوسی<sup>26</sup> وابستگی زمانی رانس را در آیسفت به طور دقیق توصیف نمی کند.

در آیسفت حساس به pH، که عایق گیت آن از نوع  $Si_3N_4$  است، سطح عایق در نتیجه قرار گرفتن در معرض محلول الکترولیت آبی، به کندی به یک لایه ی آبیده دی اکسید سیلیسیم<sup>27</sup> یا اُکسی نیتريد<sup>28</sup> تبدیل می شود [2]. تبدیل شیمیایی سطح عایق نشان می دهد که مقدار ثابت دی الکتریک لایه آبیده با مقدار این ثابت در توده رسانا تفاوت دارد. بنابراین ظرفیت خازنی کل عایق گیت که معادل ترکیب سری ظرفیت خازنی لایه آبیده سطحی و ظرفیت خازنی لایه نیتريد زیرین است، همگام با پیشرفت فرآیند آپیوشی یک تغییر زمانی نسبتاً کند را نشان می دهد. این تغییر ظرفیت خازنی کل عایق گیت منجر به تغییر زمانی یکسویه در ولتاژ آستانه و در نتیجه جریان درین می شود. نرخ آپیوشی (یعنی نرخ زمانی تشکیل لایه آبیده) در لایه های  $Si_3N_4$  بر اساس سازوکار نفوذ

<sup>29</sup> Power-law

<sup>30</sup> Relaxation

<sup>31</sup> Fick's First Law of Diffusion

<sup>25</sup> Stretched exponential decay

<sup>26</sup> Guassian

<sup>27</sup> Silicon dioxide ( $SiO_2$ )

<sup>28</sup> Oxynitride

تخلیه<sup>۳۴</sup> بین لایه های نیمه رسانای نوع  $n$  و  $p$  تشکیل می شود. از آنجا که باربرها عمدتاً در ناحیه فعال در فرآیند بازترکیب شرکت می کنند، درخشندگی اساساً ناشی از گسیل نور بوسیله این لایه فعال از دیدگاه اپتیکی است. در دیوهای نوری از نوع آلی با پیوند ناهمگون مانند دیود شکل ۴ با ایجاد ناحیه فعال در لایه دارای اندازه شکاف نواری کوچکتر امکان تحدید باربرها در ساختار دیود فراهم می شود.

بازدهی کوانتومی داخلی<sup>۳۵</sup>،  $\eta_i$  برای دیود نوری به صورت کسری از جریان کل در شرایط بایاس مستقیم تعریف می شود که ناشی از فرآیند بازترکیب در ناحیه فعال است. همچنین،  $\eta_i$  را می توان برحسب نرخ بازترکیب خالص، تفاضل نرخ بازترکیب و نرخ تولید باربرها، برای فرآیندهای تابشی و غیرتابشی به صورت

$$\eta_i = \frac{R_r - G_r}{(R_r - G_r) + (R_{nr} - G_{nr})} \quad (5)$$

تعریف کرد، که در آن  $R_r$  و  $R_{nr}$  به ترتیب نرخ بازترکیب تابشی، و نرخ بازترکیب غیرتابشی را نمایش می دهند و  $G_r$  و  $G_{nr}$  نرخ های تولید متناظر را مشخص می کنند. بازترکیب غیرتابشی شامل فرآیندهای بازترکیب با وساطت حالت های انرژی تله موسوم به بازترکیب شاکلی-هال-رید، بازترکیب در سطح لایه<sup>۳۶</sup>، و بازترکیب آگر<sup>۳۷</sup> است. با استفاده از مفهوم بازدهی کوانتومی داخلی می توان نرخ بازترکیب تابشی و غیرتابشی را به کمک معادله نرخ برای ناحیه فعال مدلسازی کرد. به طور مشخص، معادله نرخ برای چگالی الکترون،  $n$  به ازای گردش جریان کل  $I$  در مدار بیرونی (شکل ۴) در شرایط بایاس مستقیم با رابطه

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV_a} - (R_r - G_r) - (R_{nr} - G_{nr}) \quad (6)$$

بیان می شود، که در آن  $V_a$ ، حجم ناحیه فعال، حاصلضرب ضخامت لایه نورگسیل و سطح مقطع دیود برای عبور جریان است. در حالت پایدار ( $\frac{dn}{dt} \rightarrow 0$ )، پس از جایگزین کردن روابط مربوط به نرخ تولید باربرها با بار  $q$  در رابطه ۶، نرخ بازترکیب تابشی  $R_r$  از رابطه

$$R_r = \frac{\eta_i \eta_i I}{qV_a} \quad (7)$$

به دست می آید که در آن بازدهی تابشی،  $\eta_r$  به صورت  $\frac{R_r}{(R_r - G_r) + (R_{nr} - G_{nr})}$  تعریف شده است. درخشندگی یا شدت روشنایی بر واحد سطح،  $L(t)$ ، متناسب با توان نوری یا انرژی کل فوتون های گسیل شده در ثانیه از ناحیه فعال است. توان نوری، به نوبه خود، متناسب با نرخ زمانی گسیل فوتون،  $\frac{dn_{ph}}{dt}$ ، (تعداد فوتون های ساطع شده در واحد زمان) است که به صورت

$$\frac{dn_{ph}}{dt} = R_r V_a \quad (8)$$

اتلاف نمایی کشیده در چگالی حالت های انرژی تله مطابق رابطه ۲، می توان رابطه زیر را برای  $x_{HL}(t)$  به دست آورد [2]:

$$x_{HL}(t) = x_{HL}(\infty) \left\{ 1 - \exp \left[ - (t/\tau)^\beta \right] \right\} \quad (4)$$

که در آن  $x_{HL}(\infty)$  ضخامت نهایی لایه سطحی تغییر یافته است. با توجه به رابطه ۳، از آنجا که  $\Delta V_G(t)$  متناسب با  $x_{HL}(t)$  است، وابستگی زمانی رانش با وابستگی زمانی رشد لایه سطحی تغییر یافته یکسان است. لذا وابستگی زمانی رانش متناسب با عبارت  $\left\{ 1 - \exp \left[ - (t/\tau)^\beta \right] \right\}$  است که نشان می دهد نرخ رانش با گذشت زمان کاهش می یابد.

## رانش درخشندگی در دیود نورگسیل آلی

در این بخش مدلی برای رانش در دیود نور گسیل آلی ارائه می شود. نفوذ پاشنده به عنوان عامل ایجاد رانش در نقطه کار دیود نورگسیل آلی معرفی می شود و نشان می دهیم که وابستگی زمانی رانش درخشندگی در دیود نورگسیل آلی مشابه وابستگی زمانی رانش آیسفت است.

مدل پیشنهادی، کاهش درخشندگی قطعه را بر مبنای عملکرد ترازهای انرژی تله در لایه گسیل کننده به عنوان مراکز بازترکیب غیر تابشی توضیح می دهد. در دیود نورگسیل آلی تغییرات کند درخشندگی با زمان را می توان به وجود یک ثابت زمانی نسبتاً طولانی برای فرآیند به تله افتادن و آزاد شدن باربرها از تله ها نسبت داد. همانطور که در بخش قبل با عنوان مدل فیزیکی رانش در آیسفت اشاره شد، رانش در ترانزیستور اثر میدانی حساس به یون هیدروژن بر اساس سازوکار نفوذ پرشی موسوم به نفوذ پاشنده، که در آن وابستگی زمانی ضریب نفوذ به صورت قانون توان بیان می شود، مدل سازی شده است [2][3]. کاهش درخشندگی با زمان در دیود نورگسیل آلی را می توان بر اساس سازوکار نفوذ پاشنده نیز مدل سازی کرد. مدل پیشنهادی وابستگی زمانی تغییرات درخشندگی در دیود نورگسیل آلی را بر مبنای نفوذ پاشنده باربرها در حضور حالت های انرژی تله در لایه های آلی توضیح می دهد. در یک سیستم نامنظم، برای مثال در یک لایه نیمه رسانای آلی آمورف مانند Alq<sub>3</sub>، به ازای تغییرات کوچک نسبت به حالت تعادل و با فرض پیروی نرخ واهلش از قانون توان رابطه ۱، چگالی حالت های انرژی، مطابق رابطه ۲، از زوال نمایی کشیده تبعیت می کند [22][23].

ساختار دیود نورگسیل آلی نوعی شکل ۴ را، که در آن از Alq<sub>3</sub> به عنوان لایه نورگسیل استفاده شده است، در نظر بگیرید. نور عمدتاً از ناحیه فعال<sup>۳۲</sup>، که به ناحیه ذاتی<sup>۳۳</sup> نیز موسوم است، گسیل می شود. در دیوهای نوری با پیوند همگون ناحیه فعال از ناحیه

35 Internal quantum efficiency

36 Surface recombination-generation

37 Auger

32 Active region

33 Intrinsic region

33 Depletion region

شده است. در **Error! Reference source not found.** داده های تجربی رانش در یک آیسفت حساس به pH، که عایق گیت آن از نوع  $\text{Si}_3\text{N}_4$  است [2]، با نتایج به دست آمده از روابط ۶ و ۷ مقایسه شده اند. رانش یکسویه در ولتاژ آستانه آیسفت با نتایج تجربی کاهش زمانی در ظرفیت خازنی ساختار الکترولیت-نیتريد-نیمه رسانا در شرایط انباشت مطابقت دارد [2].

بر اساس نظریه محیط موثر<sup>۳۸</sup> می توان استدلال کرد که کاهش ظرفیت خازنی موثر نیتريد باعث کاهش ثابت دی الکتریک لایه آبیده می شود [2]. پارامترهای به دست آمده از برازش منحنی براساس روش بهینه سازی موسوم به الگوریتم لیونبرگ-مارکوارت<sup>۳۹</sup> در **Error! Reference source not found.** عبارت اند از  $\alpha_{HL}(\infty) = 1.05 \text{ nm}$  و  $\beta = 0/613$ ، ثابت زمانی  $\tau = 53/5$  hr، ثابت گذردهی نسبی لایه آبیده تشکیل شده روی نیتريد  $\epsilon_{HLr} = 3/52$  و چگالی بار ثابت در حد واسط  $\times 8/55$   $Q_I = 10^{-9} \text{ C/cm}^2$ . مقادیر به دست آمده برای این پارامترهای فیزیکی در گستره مقادیر قابل قبول تجربی هستند. برازش مدل نظری و داده های تجربی در **Error! Reference source not found.** با ضریب همبستگی ۰/۹۹ مشخص می شود. همانطور که اشاره شد، علت رانش در آیسفت حساس به pH، تغییر شیمیایی سطح عایق گیت (مانند آپوشی سطح نیتريد سیلیسیم) است [2]. سینتیک واکنشی که منجر به تغییر شیمیایی لایه سطحی عایق گیت می شود بر اساس نفوذ پاشنده یک عامل شیمیایی (مانند یون هیدروکسیل) مدل سازی شده است [23].

بیان می شود. با فرض ثابت ماندن بازدهی کوانتومی داخلی، به ازای یک جریان dc مشخص، نرخ بازترکیب کل در ناحیه فعال دستخوش تغییر نمی شود، لذا خواهیم داشت:

$$\Delta R_r(t) = -\Delta R_{nr}(t) \quad (9)$$

که در آن تغییرات نرخ بازترکیب با زمان را می توان به صورت  $\Delta R(t) = R(t) - R(0)$  نوشت. با در نظر گرفتن نقش حالت های انرژی تله به عنوان مراکز بازترکیب غیر تابشی، نرخ بازترکیب غیرتابشی متناسب با تغییرات چگالی تله ها است. لذا با استفاده از رابطه ۲ خواهیم داشت:

$$R_{nr}(t) = R_{nr}(0) \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right] \quad (10)$$

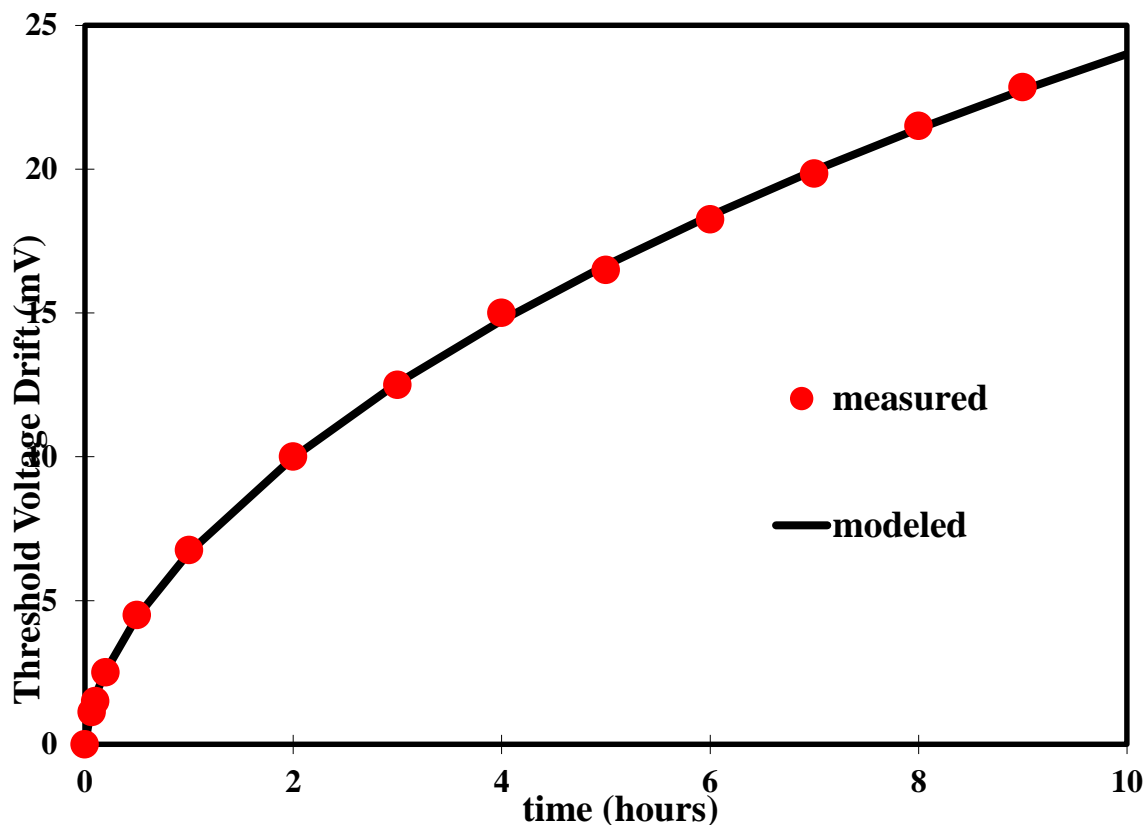
که در آن  $\beta$  پارامتر مشخصه پاشندهی در گستره  $0 < \beta < 1$  است. مطابق رابطه ۱۰، نرخ بازترکیب غیرتابشی به صورت اتلاف نمایی کشیده توصیف می شود. طبق رابطه ۸، درخشندگی متناسب با نرخ بازترکیب تابشی است، بنابراین با در نظر گرفتن روابط ۹ و ۱۰، تغییر درخشندگی،  $\Delta L(t) = L(t) - L(0)$  با زمان به صورت

$$\Delta L(t) = \Delta L(\infty) \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right] \right\} \quad (11)$$

بیان می شود. مطابق رابطه ۱۱، مشخصه رانش در دیود نورگسیل آلی با تغییرات زمانی اولیه نسبتا سریعی در درخشندگی همراه است و تغییرات درخشندگی با زمان زوال نمایی کشیده به نمایش می گذارد.

## نتایج و بحث

مدل فیزیکی رانش در آیسفت و دیود نورگسیل آلی بر اساس داده های تجربی مشخصه رانش در هر یک از این دو قطعه مقایسه



شکل ۳: مقایسه داده های تجربی و مدل رانش برای یک آیسفت حساس به pH با عایق گیت نیتريد سيليسيم در pH=7 [۲].

تجربی در **Error! Reference source not found.** همبستگی ۰/۹۹۳ بیان می شود. وابستگی زمانی رانش اساسا ناشی از وابستگی زمانی تغییر در چگالی حالت های انرژی تله است که با رابطه (۲) بیان می شود. مطابق رابطه (۲) زوال نمایی کشیده به وسیله نفوذ پاشنده باربرها در لایه های آلی آمورف (برای مثال لایه های TPD و Alq3 در دیود نورگسیل شکل ۴) قابل توضیح است. این نوع زوال معمولا در سیستم های نامنظم مشاهده می شود. به طور مشخص، نفوذ پاشنده در مواد آمورف از یک قانون توان به صورت  $(t)^{\beta-1}$  پیروی می کند که می توان آن را با استفاده از مفاهیم گردش تصادفی<sup>۴۰</sup> توجیه کرد [22]. حتی با اعمال بایاس، ساختار حالت های انرژی موضعی در یک ماده آمورف، که ناشی از ماهیت شیمیایی حالت های انرژی تله و محیط موضعی باربرهای به دام افتاده است، در شرایط شبه تعادل<sup>۴۱</sup> قرار دارد. مشخصا، چگالی حالت های انرژی تله ناشی از پیوندهای آویزان<sup>۴۲</sup>، و حالت های انرژی دهنده یا پذیرنده به دما وابسته است، چنانکه به ازای انحراف های کوچک

به منظور راستی آزمایی مدل ارائه شده برای رانش درخشندگی، دیود نورگسیل آلی شکل ۴، که مشخصه ناپایداری آن در مرجع [24] گزارش شده، مورد استفاده قرار گرفته است. در این دیود زیرلایه متشکل از یک لایه ITO است که با شیشه پوشانده شده است. لایه آلی نخست به ضخامت ۶۰۰ آنگستروم از TPD ساخته شده است و لایه آلی دوم از ماده نورگسیل Alq3 با ضخامت یکسان ۶۰۰ آنگستروم تشکیل شده است. ساختار الکتروود دیگر متشکل از یک لایه ۱۰۰۰ آنگسترومی از جنس منیزیم و یک لایه ۱۰۰۰ آنگسترومی از جنس نقره است [24]. **Error! Reference source not found.** تغییرات محاسبه شده درخشندگی با زمان بر اساس مدل پیشنهادی و تغییرات اندازه گیری شده این کمیت با زمان را در دیود نور گسیل آلی شکل ۴ نشان می دهد [24]. براساس روش بهینه سازی لیونبرگ-مارکوارت، به ازای مقادیر استخراج شده  $84 \text{ cd/m}^2$  برای  $\Delta L(\infty)$ ،  $3/68$  ساعت برای  $\tau$  و  $0/38$  برای پارامتر پاشندگی  $\beta$ ، برازش مدل نظری و داده های

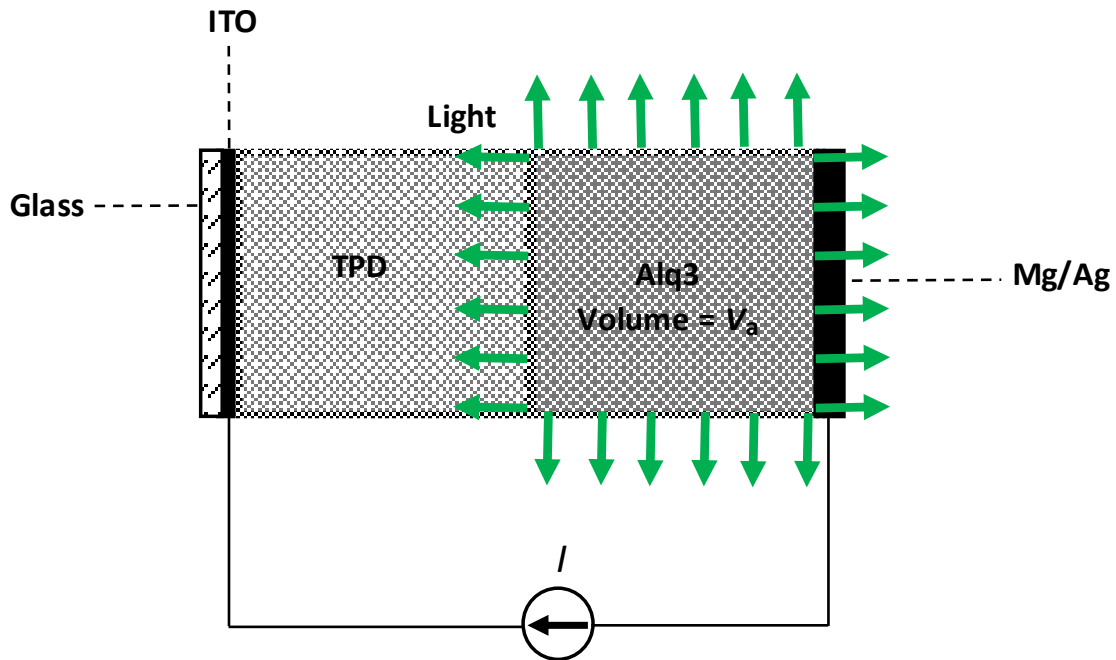
<sup>42</sup> Dangling bonds

<sup>40</sup> Random Walk

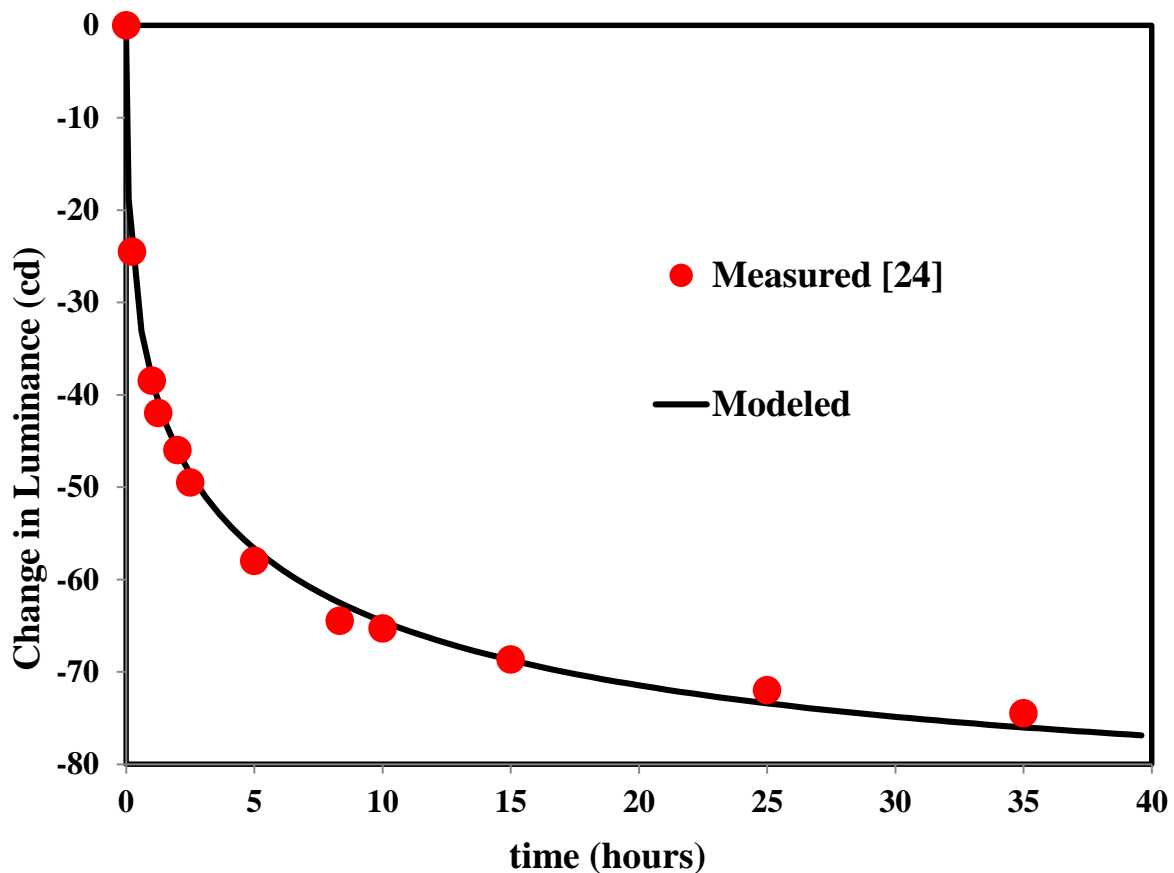
<sup>41</sup> Quasi-equilibrium

تله ناشی از وجود مولکول‌های خارجی موجود در داخل لایه گسیل کننده دیود نورگسیل آلی هستند، که با تولید حالت های انرژی تله به عنوان مراکز بازترکیب غیرتابشی عمل می‌کنند [11]. به تله افتادن باربرها در این ترازهای انرژی منجر به کاهش بازترکیب تابشی و در نتیجه کاهش درخشندگی می‌گردد. از آنجا که مقدار ثابت زمانی مربوط به فرآیند انتقال پاشنده در رابطه ۲ نسبتاً بزرگ است، کاهش درخشندگی که مشخصه رانش در دیود نورگسیل آلی است به کندی صورت می‌گیرد. مطابق رابطه ۲ بالاترین میزان تغییر در چگالی حالت‌های انرژی تله در آغاز فرآیند نفوذ پاشنده رخ می‌دهد. به این ترتیب، همانطور که در **Error! Reference source not found.** مشاهده می‌شود، بیشترین تغییر در نرخ بازترکیب غیرتابشی و در نتیجه درخشندگی به ازای زمان های نسبتاً کوتاه حاصل می‌شود. بنابراین مدل پیشنهادی تعبیر فیزیکی قابل قبولی از تغییرات نرخ زمانی درخشندگی به دست می‌دهد.

از تعادل حرارتی، زمان لازم برای دستیابی مجدد به تعادل بوسیله دما فعالسازی شده و در دماهای پایین تر طولانی تر می‌شود. علت واهلش کند وجود سدهای انرژی است که نرخ گذار میان حالت های انرژی قابل دسترسی را محدود می‌سازند. چینش مجدد آرایش پیوندی، که امکان تغییر در توزیع حالت های انرژی موضعی را فراهم می‌کند با نفوذ پاشنده باربرها همراه است [22]. برابر به دام افتاده در یک تله با سطح انرژی مشخص امکان دستیابی به حالت های انرژی موضعی را در فرآیندی با عنوان به دام اندازی متعدد<sup>۴۳</sup> دارا است [22]. منشا نفوذ پاشنده در مواد آمورف توزیع نمایی انرژی تله ها به صورت  $\exp(-\frac{E}{kT_0})$  است که در آن پارامتر مشخصه نفوذ پاشنده،  $\beta$  و پهنای توزیع انرژی تله ها به ترتیب برابر با  $kT_0$  و  $\frac{T}{T_0}$  هستند. همانطور که در بخش قبل مطرح شد، رانش در دیود نورگسیل آلی معادل یک تنزل ذاتی در کارایی قطعه است که ناشی از فرآیندهای داخلی فیزیکی-شیمیایی است [24]. ترازهای انرژی



شکل ۴: ساختار دیود نورگسیل آلی ساده مرجع [24] با Alq3 به عنوان لایه نورگسیل



شکل ۵: مقایسه داده های تجربی و مدل رانش درخشندگی برای دیود نورگسیل آلی با ساختار ITO/TPD/Alq3/Mg/Ag و به ازای بایاس مستقیم 4.5V [24].

حساس به pH بوسیله نفوذ پاشنده در حضور ترازهای انرژی تله توصیف شد. در دیود نورگسیل آلی نفوذ پاشنده باربرها در لایه گسیل کننده نور همراه با حرکت پرشی میان ترازهای انرژی تله به عنوان عامل رانش توجیه شد. برای هر دو قطعه وجود یک برازش خوب میان داده های مدل سازی شده و داده های تجربی برای مشخصه رانش به دست آمد.

#### منابع:

- [1] P. Bergveld, "Development of an Ion-Sensitive Solid-State," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, no. January, pp. 70–71, 1970.
- [2] S. Jamasb, S. D. Collins, and R. L. Smith, "A physical model for threshold voltage instability in Si3N4-Gate H+-sensitive FET's (pH ISFET's)," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, no. 6, pp. 1239–1245, 1998, doi: 10.1109/16.678525.
- [3] S. Jamasb, S. Collins, and R. L. Smith, "A

وابستگی زمانی مشخصه نفوذ پاشنده به همراه ثابت زمانی نسبتاً طولانی در فرآیند به تله اندازی و آزادسازی باربرها در مواد آمورف می تواند وابستگی زمانی رانش ولتاژ آستانه در ترانزیستورهای اثر میدانی حساس به یون هیدروژن و وابستگی زمانی تغییرات درخشندگی در دیود نورگسیل آلی را توضیح دهد. مطابق رابطه ۱۱، این وابستگی زمانی در فرآیندهای دریافت و تغییرات درخشندگی به صورت عبارت  $\{1 - \exp[-(t/\tau)^\beta]\}$  است. مواد آمورف حاوی ترازهای انرژی تله در آیسفت و دیود نورگسیل آلی به ترتیب عایق حساس به گیت و لایه گسیل کننده هستند.

#### نتیجه گیری

مدل های فیزیکی برای توصیف پدیده رانش در آیسفت حساس به pH و دیود نور گسیل آلی ارائه شدند. در یک ماده آمورف حاوی ترازهای انرژی تله، نفوذ پاشنده که با فرآیندهای به تله اندازی و آزادسازی کند همراه است، منجر به ایجاد وابستگی زمانی یکسانی برای رانش در هر دو نوع قطعه می شود. رانش در آیسفت حساس به pH بر اساس محدود شدن نرخ تغییر شیمیایی سطح عایق

- large area organic light emitting diodes aged under stress,” *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, pp. 1–4, 2018.
- [15] A. Al Haddad, L. Canale, A. Picot, G. Zissis, P. Maussion, and P. Dupuis, “Degradation of the luminance and impedance evolution analysis of an OLED under thermal and electrical stress,” *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 4260–4267, 2019.
- [16] O. A. Kittaneh, S. Helal, H. Almorad, H. A. Bayoud, G. Abufoudeh, M. A. Majid, “Preferable Parametric Model for the Lifetime of the Organic Light-Emitting Diode Under Accelerated Current Stress Tests”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 68, no. 9, pp. 4478 - 4484, 2021, doi: 10.1109/TED.2021.3097974.
- [17] Q. Chen, D. Geng, Y. Su, X. Duan, H. Ji, L. Li, “A Novel Dynamic Time Method for Organic Light-Emitting Diode Degradation Estimation in Display Application”, *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, no. 6, pp. 887–890, 2021, doi: 10.1109/LED.2021.3073146.
- [18] L. Diodes, D. W. Kim, H. Oh, B. D. Youn, and D. Kwon, “Bivariate Lifetime Model for Organic Light-Emitting Diodes,” *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol. 64, no. 3, pp. 2325–2334, 2017.
- [19] H. Kim, H. Shin, J. Park, Y. Choi, and J. Park, “Statistical Modeling and Reliability Prediction for Transient Luminance Degradation of Flexible OLEDs,” *2018 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)* no. Eq 1, pp. 1–6, 2018.
- [20] L. Res and M. Engineering, “A life estimation model applied to organic light-emitting diodes,” *Lighting Res. Technol.* 51 pp. 1–10, 2018.
- [21] Oh K., Hong S.K., Kwon O. K., Lifetime Extension Method for Active Matrix Organic Light-Emitting Diode Displays Using a Modified Stretched Exponential Decay Model, *IEEE Electron Device Lett.* 36 (2015) 277-279.
- [22] Kakalios J., Street R., Jackson W., Stretched-Exponential Relaxation Arising from Dispersive Diffusion of Hydrogen in Amorphous Silicon, *Phys. Rev. Lett.* 53 (1987) 1037-1040.
- [23] Jamasb S., Kinetics of the Hydration Reaction at the Electrolyte-insulator Interface, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 53 (2017) 59–63.
- physical model for drift in pH ISFETs,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 49, no. 1–2, pp. 146–155, 1998, doi: 10.1016/S0925-4005(98)00040-9.
- [4] C. W. Tang and S. A. Vanslyke, “Organic electroluminescent diodes,” *Applied Physics Letters*, vol. 51, no. 12, pp. 913–915, 1987, doi: 10.1063/1.98799.
- [5] J. H. Burroughes *et al.*, “Light-emitting diodes based on conjugated polymers,” *Nature*, vol. 347, no. 6293, pp. 539–541, 1990, doi: 10.1038/347539a0.
- [6] M. Zubair, Y. S. Ang, L. K Ang, “Thickness Dependence of Space-Charge-Limited Current in Spatially Disordered Organic Semiconductors”, *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 65, no. 8, pp. 3421 - 3429, 2018, doi: 10.1109/TED.2018.2841920.
- [7] S. Jung, Y. Lee, A. Plews, A. Nejm, Y. Bonnassieux, G. Horowitz, “Effect of Gaussian Disorder on Power-Law Contact Resistance and Mobility in Organic Field-Effect Transistor”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 68, no. 1, pp. 307-310, 2021, doi: 10.1109/TED.2020.3035494.
- [8] J. Kim, M. Billah, J. Jang, “Ultra-Low Power, Emission Gate Driver With Pulse Width Modulation Using Low-Temperature Poly-Si Oxide Thin-Film Transistors”, *IEEE Electron Device Letters*, vol. 43, no. 2, pp. 236–239, 2022, doi: 10.1109/LED.2021.3137195.
- [9] D. Kim, Y. Kim, S. Lee, M. S. Kang, D. H. Kim, and H. Lee, “High Resolution a-IGZO TFT Pixel Circuit for Compensating Threshold Voltage Shifts and OLED Degradations,” vol. 1, no. c, 2017, doi: 10.1109/JEDS.2017.2716368.
- [10] D. Kim, Y. Kim, S. Lee, M. S. Kang, D. H. Kim, and H. Lee, “High Resolution a-IGZO TFT Pixel Circuit for Compensating Threshold Voltage Shifts and OLED Degradations,” vol. 1, no. c, 2017, doi: 10.1109/JEDS.2017.2716368.
- [11] K. Leo, “Efficiency and Stability of p-i-n Type Organic Light Emitting Diodes for Display and Lighting Applications,” vol. 97, no. 9, 2015.
- [12] A. Pinato *et al.*, “Impact of Trapped Charge and Interface Defects on the Degradation of the Optical and Electrical Characteristics in NPD / Alq 3 OLEDs,” vol. 57, no. 1, pp. 178–187, 2010.
- [13] N. C. Giebink *et al.*, “Direct evidence for degradation of polaron excited states in organic light emitting diodes Direct evidence for degradation of polaron excited states in organic light,” vol. 124514, no. 2009, 2013.
- [14] A. Alchaddoud, G. Zissis, and L. Canale, “Impedance spectroscopy and evolution of the equivalent electrical circuit model for

- [24] McElvain J., Antoniadis H., Hueschen M., Miller J., Roitman D., Sheats J., Moon R., Formation and growth of black spots in organic light-emitting diodes, *J. Appl. Phys.* 80 (1996) 6002-6007.

## Threshold Voltage Drift in H<sup>+</sup>-sensitive FETs and Drift of Luminance in Organic Light-emitting Diodes: The role of Dispersive Diffusion

Shahriar Jamasb<sup>1</sup>, Mojtaba Mazaheri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant professor, Department of Biomedical Engineering, Hamedan University of Technology, [jamasb@hut.ac.ir](mailto:jamasb@hut.ac.ir)

<sup>2</sup>Assistant professors, Department of Basic Science, Hamedan University of Technology

### Abstract

The drift phenomenon is manifested as instability in the operating point of the H<sup>+</sup>-sensitive (pH-sensitive) ion-selective field effect transistor as well as that of the organic light-emitting diode. Specifically, in the pH-sensitive ion-selective field effect transistor, drift is observed as a slow temporal and unidirectional change in the threshold voltage, and hence, the dc bias current of the device. In the organic light-emitting diode, on the other hand, drift is detected as a decrease in luminance with time. The operating point drift in both devices has been modeled based on a diffusion mechanism, known as dispersive diffusion, which involves hopping between trap energy states. Notably, the similarity between the time dependence of drift in these devices is due to the characteristic temporal behavior of the dispersive diffusion coefficient, which obeys a power law characterized by a time dependence of the form  $(t)^{\beta-1}$ , where  $\beta$  is the dispersion parameter, which satisfies  $0 < \beta < 1$ .

### Keywords:

Dispersive diffusion, Drift, Ion-selective field-effect transistor, Organic light-emitting diode, Stretched exponential decay