available online @ www.jscw.icrc.ac.ir
نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ
نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir
وزارت علوم تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ

کاربردهای متنوع چاپگرهای جوهرافشان DOD به عنوان ابزار تولید

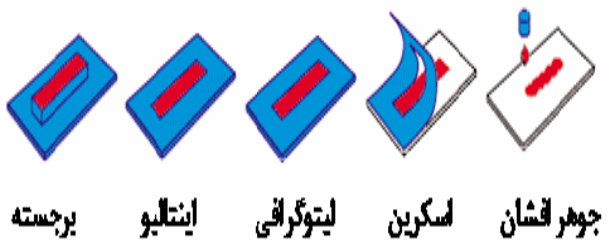
محمد مومنی‌نسب[1]، سید منصور بیدکی[2*]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۹۵۷۴۱
۲- استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۹۵۷۴۱

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش:۹۰/۴/۲۲

چکیده
چاپ جوهرافشان به‌دلیل قابلیت پاشش جوهر بر دامنه وسیعی از مواد، مانند فلزات، سرامیک‌ها و پلیمرها از قابلیت‌های زیادی در تولید محصولات مختلف برخوردار است. امکان استحصال مواد بر روی زیر لایه‌های حساس، ارائه حداکثر وضوح dpi ۴۸۰۰×۱۲۰۰ و کوچک‌ترین حجم قطره پرتابی تا یک پیکولیتر در چاپ جوهرافشان میسر می‌باشد. فناوری جوهرافشانی اگر چه اولین بار برای چاپ متن و عکس بر کاغذ به کارگرفته شد ولی امروزه این فناوری حتی در تولید نمونه بافت‌های بدن با استفاده از سلول‌های زنده و یا ساخت حسگرها با استفاده از جوهرهای بیولوژیکی و رسانا به کارگرفته شده است. کاربرد این روش به دلیل سرعت، انعطاف، تمیزی و غیره در تولید ادوات و قطعات الکترونیکی که با نام الکترونیک چاپی شناخته می‌شود رو به رشد است. در این مقاله مروری، ضمن معرفی فناوری جوهرافشانی و سازوکارهای مربوطه، قابلیت‌ها و کاربردهای مختلف آن در نساجی، بیولوژی، حسگرها و بخصوص در الکترونیک و اجزاء میکرو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی
چاپ جوهرافشان، تولید جوهرافشانی، استحصال مواد، الکترونیک چاپ شده، چاپ سه بعدی.

۱- مقدمه
چاپ به معنای انتقال و تکثیر حروف، عکس و طرح بر روی سطوح چاپ شونده‌ای همچون مواد سلولزی، پارچه‌ای، فلزی، شیشه‌ای با اَشکال صاف یا ناهموار، مقعر یا محدب می‌باشد. چاپ انواع مختلفی دارد که می‌توان آنها را به دو دسته چاپ‌های تماسی و دیجیتالی دسته‌بندی کرد. از جمله چاپ‌های تماسی می‌توان به انواع چاپ برجسته[1]، گود[2]، گود صاف یا هم‌سطح[3] و نوری[4] اشاره کرد و از چاپ‌های دیجیتال یا کامپیوتری می‌توان چاپ‌های لیرزی و جوهرافشان را نام برد که در این میان، روش جوهرافشانی به دلیل غیر تماسی بودن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از روش‌های متداول چاپ، لیتوگرافی و شابلونی، در بسیاری از موارد در صنعت الکترونیک چاپ شده[5] برای ساختن بسیاری از مدارها بکار گرفته شده‌اند [۱]. معمولاً این روش‌ها زمان‌بَر و گران بوده و فرآیندهای بسیار پیچیده‌ای دارند چرا که مراحل فرآیند زیادی جهت ساختن مدارها مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر این، فرآیند چاپ در این روش‌ها ضایعات شیمیایی زیادی را تولید می‌کنند. فناوری چاپ جوهرافشان مزایای مختلفی از جمله امکان چاپ مستقیم خطوط رسانا، دارا بودن هزینه و ضایعات پائین، سادگی و قابل تمیزی فرآیند را نسبت به روش‌های متداول داشته که آن را به عنوان جایگزینی مطلوب برای چاپ‌های متداول معرفی نموده است (شکل ۱).



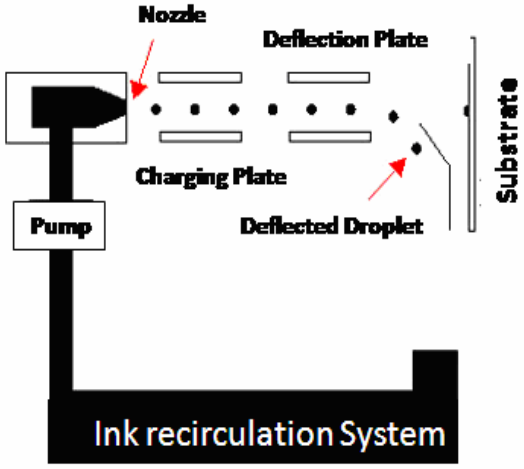
شکل ۱- مقایسه تکنیک‌های مهم چاپ [۲].

۲- اصول چاپ جوهرافشان و سازوکارهای ایجاد قطره
چاپ جوهرافشان نوعی از چاپ دیجیتال است که اصول کار آن بر مبنای پرتاب قطرات سیال با اندازه‌های متغیر بر روی بستر مورد نظر بوده که جهت پرتاب قطرات از سازوکارهای جوهرافشان مداوم[6] و قطره در صورت نیاز[7] استفاده می‌شود. در روش جوهرافشانی مداوم شکل ۲، قطرات جوهر از درون روزنه‌های نازل چاپگر به صورت مداوم به بیرون پرتاب شده و با عبور از میان یک میدان الکتریکی تحت کنترل توسط چاپگر بر سطح بستر مورد چاپ فرود می‌آیند. در صورت عدم نیاز به قرارگیری هر یک از قطرات پرتاب شده بر روی بستر مورد چاپ، میدان الکتریکی به گونه‌ای تغییر

[1] Letter-press-Flexography
[2] Gravure
[3] Offset- Lithography
[4] Screen Printing
[5] Printed Electronics
[6] Continuous Inkjet
[7] Drop on demand

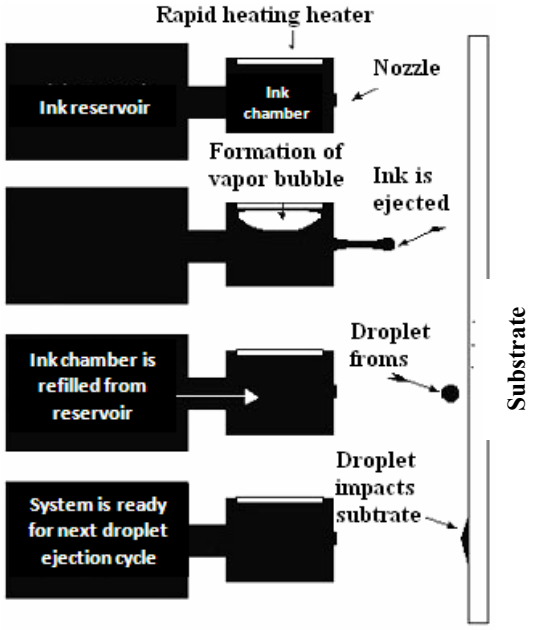
*Corresponding author: smbidoki@yazuniac.ir

می‌یابد که قطرات در حال فرود به سمت کانال جمع‌کننده جوهر منحرف شده و از مسیر فرود بر روی بستر چاپ خارج شوند. قطرات منحرف شده دوباره وارد سیکل چاپ می‌گردند. با بکارگیری این روش چاپ جوهرافشان، امکان ایجاد طرح‌های ساده بر روی زیر لایه متحرک با سرعت بالا وجود دارد.

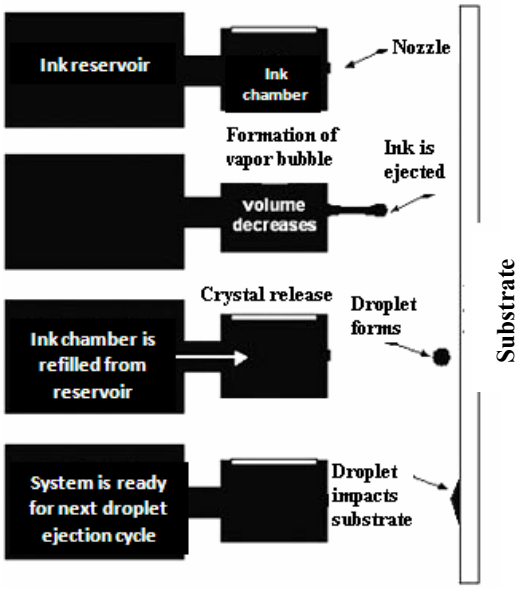


شکل ۲- سازوکار جوهرافشان مداوم [۳].

در روش قطره در صورت نیاز، بر خلاف روش جوهر افشانی مداوم، قطره جوهر تنها در صورتی از درون نازل به بیرون پرتاب می‌شود که لازم باشد بر روی بستر مورد چاپ قرار گیرد و در غیر این صورت هیچ قطره‌ای شلیک نمی‌شود. روش چاپ قطره در صورت نیاز به دو صورت جوهرافشان گرمایی[1] و جوهرافشان پیزوالکتریک[2] وجود دارد. در سازوکار گرمایی (شکل۳)، جوهر چاپ که الزاماً بر پایه آب می‌باشد، از یک مخزن به داخل محفظه جوهر وارد می‌شود. یک المان حرارتی جوهر را به سرعت گرم و باعث تبخیر حلال و ایجاد حباب حلال در درون محفظه جوهر می‌گردد. نیروی حاصل از افزایش حجم شدید حباب حلال تشکیل شده در فضای محدود محفظه، جوهر را از روزنه به بیرون رانده و باعث تشکیل قطره و پاشش آن به سمت زیر لایه می‌گردد. محفظه جوهر قبل از اینکه قطره بعدی جوهر پرتاب شود پر خواهد شد. فرآیند پیوسته گرمایشی-سرمایشی المان حرارتی، نسبتاً کند است اگر چه این فرآیند در کسری از ثانیه کامل می‌شود. در جوهرافشان گرمایی ترکیب جوهرها لزوماً بر پایه آب می‌باشد.



شکل ۳- سازوکار جوهرافشان گرمایی [۳].



شکل ۴- سازوکار جوهرافشان پیزویی [۳].

در سازوکار پیزوالکتریک (شکل ۴)، به‌جای کاربرد یک المان حرارتی، از بلورهای پیزوالکتریک در ساختار دیواره‌های محفظه جوهر قرار گرفته در پشت هر نازل جوهرافشان استفاده می‌شود. با اعمال ولتاژ الکتریکی، سرامیک پیزوالکتریکی تغییر شکل یا تغییر اندازه داده که این امر باعث ایجاد یک فشار ضربه‌ای در محفظه جوهر شده و محفظه با کاهش حجم خود باعث پرتاب قطره به سمت زیر لایه می‌شود. تنوع جوهرهای قابل کاربرد در جوهرافشان‌های پیزوالکتریک به دلیل عدم ایجاد گرما در درون محفظه جوهر که می‌تواند به رسوب مواد حل شده منجر شود نسبت به جوهرافشان‌های گرمایی بیشتر است، اگر چه سامانه‌های چاپ جوهرافشانی پیزوالکتریک گران‌تر هستند [۳].

۳- قابلیت‌ها و محدودیت‌های چاپ جوهرافشان

[1] Thermal inkjet
[2] Piezoelectric inkjet

مقاله

چاپ جوهرافشان، پاشش کنترل شده قطرات کوچک مایع (تا حجم یک پیکولیتر) بر روی زیر لایه را شامل شده که در بسیاری از موارد جهت چاپ متون و کارهای گرافیکی در مقیاس کوچک استفاده می‌شود. در حال حاضر این روش چاپ به بطور فزآینده‌ای جهت چاپ طرح‌ها در سفارشات چاپی دقیق و در عین حال با کمیت پائین بکار گرفته می‌شود. از آنجا که روش چاپ جوهرافشان فرآیندی دیجیتال است، هر محصولی به تبع آن می‌تواند متفاوت از محصول دیگری ساخته شود. این روش همچنین با ارائه دامنه وسیعی از قابلیت‌ها و امکانات که برای یک روش چاپ منحصر به فرد است، در ایجاد اجزاء ریز با ظرافت و وضوح بالا (تا دقت ۴۸۰۰dpi×۱۲۰۰) نیز به کار گرفته شده است. چند ویژگی، چاپ جوهرافشان را مخصوصاً جهت کاربردهای صنعتی جالب توجه کرده است: نخست، چاپ جوهرافشان فرآیندی دیجیتال می‌باشد. موقعیت هر قطره جوهر بر روی صفحه x-y می‌تواند از پیش تعیین شده و در صورت لزوم می‌تواند فوراً جهت تنظیم انحراف یا غیر هم محور بودن زیر لایه و یا اطمینان از دست یافتن به ضخامت نهایی مورد نیاز در لایه پاشیده شده بر سطح بستر اصلاح شود. دوم، چاپ جوهرافشان روشی غیر تماسی است و تنها نیروهای اعمال شده بر بستر چاپ، از برخورد قطرات کوچک مایع حاصل می‌شوند. بنابراین چاپ برروی زیر لایه‌های ظریف و شکننده که در روش‌های چاپ متداول قابل استفاده نمی‌باشند، به روش چاپ جوهرافشانی امکان‌پذیر می‌شود. سوم، دامنه گسترده‌ای از مواد را می‌توان به روش جوهرافشانی بر سطح بستر مورد چاپ قرار داد که بدین ترتیب امکان ساخت سازه‌های سه‌بعدی با ترکیبات چندگانه مواد نیز بر سطح بستر چاپ وجود دارد بطوریکه ساختارهای چند لایه و پیچیده نیز با این روش قابل تولید خواهند بود [۴]. از مهم‌ترین محدودیت‌های چاپ جوهرافشان ساختمان کارتریج‌ها است که نازل‌های آنها پس از مدتی مسدود می‌شود. همچنین، جوهر مورد استفاده در بیشتر جوهرافشان‌ها محلول در آب می‌باشد و لذا پس از چاپ باید از تماس آب با طرح چاپ شده اجتناب نمود. از دیگر معایب غیرقابل چشم‌پوشی در چاپ جوهرافشان قیمت بالای جوهرهای مصرفی است که در تولیدات چاپی به تعداد بسیار زیاد مقرون به صرفه نمی‌باشد. ساخت جوهرهای چاپ جوهرافشان بسیار حساس و دقیق بوده به گونه‌ای که ترکیب آن امکان تولید چاپی دقیق را همراه با تضمین طول عمر نازل‌های چاپ و زمان خشک شدن مطلوب را یک‌جا ارائه دهد. به عنوان مثال، کوتاه کردن زمان خشک شدن چاپ با به کارگیری حلال‌های فرار، سبب کاهش عمر نازل می‌گردد. جوهر به کاربرده شده در چاپ جوهرافشان باید از نظر فیزیکی دارای ویژگی‌های خاصی باشد. این جوهرها باید دارای کشش سطحی و گرانروی مناسبی باشند و مشکلاتی از قبیل مسدود شدن نازل‌ها که به دلیل تبخیر و یا جرم گرفتن روزنه‌های نازل پدید می‌آیند را نداشته باشد و از رنگ‌های خالص تهیه شده باشند. در این خصوص، فناوری جوهرافشان مداوم، امکان به کارگیری محدوده وسیعی از جوهرها را فراهم ساخته و مشکلات مسدود شدن نازل، به دلیل پیوسته بودن روند پاشش قطرات جوهر کمتر روی می‌دهد. از جمله مشکلاتی که در جوهرافشان حرارتی مشاهده می‌شود مربوط به دمای گرمکن‌هاست که گاه به ۳۶۰°C می‌رسد و با تبخیر جوهر و ایجاد رسوبات خشک بر جداره‌ها باعث تغییر در میزان انتقال حرارت و کاهش کارائی سامانه پاشش جوهر می‌گردد [۶-۴]. مرکب، یکی از اساسی‌ترین اجزاء در چاپگرهای جوهرافشان می‌باشد. ساختار شیمیایی و خصوصیات فیزیکی مرکب مانند حلالیت، فشار بخار، گرانروی، مقاومت سطحی و همچنین فرمولاسیون آن در عملکرد خروج قطره از نازل و در نتیجه در کیفیت تصویر چاپ شده اثر می‌گذارند. انرژی سطح زیرآیند (بستر مورد چاپ) نیز در قابل اطمینان بودن سیستم چاپ و همچنین میزان پخش قطره بر سطح بستر نقش به سزایی دارد. علاوه بر موارد فوق باید به این نکته نیز توجه نمود که وضوح طرح‌های قابل چاپ توسط چاپگرهای جوهرافشان فقط به اندازه نهایی قطره پرتاب شده از سامانه جوهرافشان که پس از قرار گرفتن بر سطح بستر چاپ تا حدی بر سطح آن پخش و خشک شود بستگی ندارد و به دقت نشاندن قطره بر روی زیرلایه نیز وابسته می‌باشد. دقتی که تحت تأثیر میزان دقت به کار گرفته شده در تنظیم نحوه حرکت زیرلایه و سامانه چاپ و تغییرات ذاتی روی داده در فواره‌ای که از سامانه چاپ خارج می‌شود، بستگی دارد. همچنین وضوح مورد نظر به تأثیرات آیرودینامیکی[1] و الکترواستاتیکی[2] در حین پرتاب قطره، وجود قطرات ماهواره‌ای[3] که از ایجاد تلاطمات ناخواسته در فرآیند تشکیل قطره از جت در حال بیرون پرتاب شدن از روزنه نازل به وجود می‌آید و دیگر موارد تغییردهنده فرآیند از جمله تغییر در اندازه و سرعت قطرات مرتبط می‌باشد. وضوح قطرات مایع که از سامانه چاپ بر روی زیرلایه پرتاب می‌شوند متأثر از نوع زیرلایه (آبگریز یا آبدوست بودن) و چگونگی پخش شدن قطرات بر بستر مورد نظر نیز می‌باشد [۴]. به عنوان مثال از محدودیت‌های چاپ جوهرافشان در چاپ منسوجات می‌توان به پایین بودن سرعت تولید، ثبات کم، گرانروی پایین جوهر، کوچک بودن حجم مخزن جوهر و همچنین نیاز به آماده‌سازی ویژه پارچه قبل از فرآیند چاپ اشاره نمود [۷].

۴-کاربردهای چاپ جوهرافشان

چاپ جوهرافشان به دلیل قابلیت پاشش دامنه وسیعی از مواد شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و غیره دارای قابلیت‌های زیادی جهت کاربردهای صنعتی می‌باشد. امکان نشاندن مواد مختلف بر سطح زیر لایه‌های با ساختار متفاوت، چاپ جوهرافشان را به عنوان روشی با مزیت‌های فراوانی چون کاهش ضایعات تولیدی، سرعت بالا، دمای مناسب برای نشاندن مواد بر بستر و غیره ارائه نموده است. این قابلیت‌ها و مزایا، روش چاپ جوهرافشان را به عنوان روشی صنعتی جهت جایگزین کردن روش‌های چاپ شابلونی و فتولیتوگرافی در تولید لایه‌های نازک (حسگرها)، اجزاء الکتریکی، سیستم‌های میکرو الکتریکی- مکانیکی و غیره معرفی کرده است. به عنوان مثال کاربرد این روش در صنعت نساجی، محدودیت تعداد رنگ و اندازه واحد تکراری طرح موجود در چاپ‌های متداول را رفع نموده و کاهش فوق‌العاده زیادی را در زمان تهیه نمونه‌های چاپ شده بدون نیاز به آماده‌سازی شابلون را موجب شده است. گسترش این فناوری

[1] Aerodynamic
[2] Electrostatic
[3] Satellite droplets

در شاخه‌های دیگر علم و صنعت به حدی بوده است که امروزه روش جوهرافشان قادر به کاشت سلول‌های زنده در وضوحی با اندازه میکرومتر و آرایشی مشابه بافت‌های بیولوژیکی می‌باشد. نمونه‌هایی از کاربردهای متنوع چاپ جوهرافشان در صنایع و علوم مختلف همچون نساجی، حسگرها، بیولوژی و به خصوص در ساخت قطعات الکتریکی و وسایل الکترونیکی در زیر ارائه شده است.

۴-۱- چاپ جوهرافشان مایعات رنگی و کاربرد آن در صنعت نساجی

چاپ جوهرافشان منسوجات، اگر چه بیشتر بر استفاده از جوهرهای ساخته شده از محلول رنگزاها مانند رنگزاهای اسیدی برای ابریشم، نایلون و پشم، رنگزاهای دیسپرس برای پلی‌استر و رنگزاهای راکتیو برای پنبه و ویسکوز تمرکز داشته ولی جوهرهای ساخته شده از تعلیق رنگدانه‌ها که با تمامی الیاف سازگار می‌باشند نیز امروزه به نحو چشم‌گیری در این روش به کار گرفته شده است. جوهرهای رنگدانه‌ای شامل ذرات جامد در اندازه‌های nm ۱۵۰-۵۰ به صورت یک سیستم ذرات کلوئیدی بوده، در صورتی که جوهرهای رنگینه‌ای شامل محلول‌های رنگی همگن می‌باشد. در چاپ جوهرافشان بر پایه جوهرهای رنگدانه‌ای، منسوجات نیاز به عملیات قبل از چاپ خاصی نداشته و فقط نیاز به عملیات بعدی جهت خشک نمودن جوهر و پخت رزین چسباننده رنگدانه به بستر دارند حال آنکه در جوهرهای رنگینه‌ای، برای دست یافتن به خواص شستشویی مناسب، همه پارچه‌ها نیاز به انجام عملیات خاص و پیچیده و تا حدودی مضر برای محیط زیست را قبل و بعد از انجام فرآیند چاپ دارند. به عنوان مثال، جوهرهای دارای رنگزاهای راکتیو برای چاپ بر کالای تهیه شده از الیاف پنبه و یا ویسکوز ریون نیاز به عملیات قلیایی قبل از چاپ و بخاردهی و شستشوی بعدی دارند [۸، ۶]. علیرغم پیشرفت‌هایی که در فناوری‌های چاپ جوهرافشان بر روی منسوجات صورت گرفته است، محدودیت‌هایی مشاهده می‌گردد که بعضی از آنها به ذات این فناوری مربوط است. در چاپ منسوجات، چاپگرهای غیر جوهرافشان متداول دارای سرعت کاری نسبتاً مناسبی بوده و لااقل نیاز به انجام عملیات خاصی قبل از انجام فرآیند چاپ نداشته اگرچه استفاده از این روش‌های چاپ در تولیدات با متراژ کم به دلیل هزینه‌های کارگری فراوان، زیاد بودن هزینه‌های طراحی شابلون، ضایعات پارچه و نیاز به استفاده از حجم زیاد خمیر چاپ، محدودیت ابعاد راپورت طرح، محدودیت تعداد رنگ و غیره چندان اقتصادی نمی‌باشند، اما در مقابل، چاپ جوهرافشان، محدودیت تعداد رنگ و ابعاد راپورت طرح موجود در چاپ‌های متداول را رفع نموده و کاهش فوق‌العاده زیادی را در زمان چاپ نمونه‌های اولیه بدون نیاز به آماده‌سازی شابلون را به همراه داشته است. بر این اساس، فناوری چاپ جوهرافشان جهت تولید به هنگام و تولید سفارشی مناسب می‌باشد. از جمله محدودیت‌های چاپ جوهرافشان به مواردی چون پایین بودن سرعت تولید، ثبات کم طرح چاپ شده، گرانروی پایین جوهر و همچنین کم بودن حجم مخزن جوهر اشاره نمود. از کاربردهای مهم قابل ذکر این فناوری در صنعت نساجی می‌توان به چاپ پوشاک، چاپ کفپوش و پارچه‌های پرزدار، چاپ وسایل تزیینی، پارچه مبلمان، روکش میز، روبان‌ها، منسوجات خودرو، نمونه‌گیری و تولیدات با حجم کم اشاره کرد [۸،۹].

۴-۲- کاربرد چاپ جوهرافشان در ساخت حسگرها

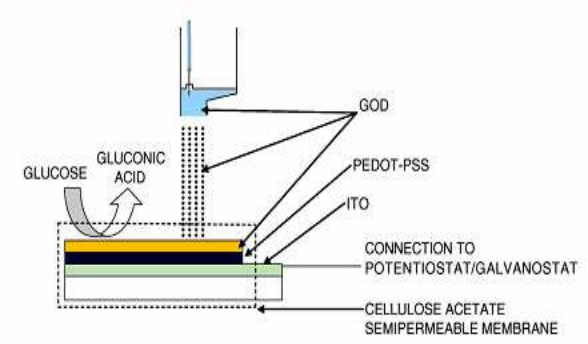
حسگر زیستی[1] وسیله‌ای تحلیلی[2] می‌باشد [۱۰] که یک پاسخ بیولوژیکی را به یک پیام الکتریکی تبدیل می‌کند. در حسگرهای حیاتی [۱۱] پیدا کردن گونه‌های شیمیایی یا بیوشیمیایی به‌وسیله عنصر بیولوژیکی از طریق مبدل الکترونیکی حاصل می‌شود. برای اندازه‌گیری عامل‌های فیزیولوژیکی در آزمایشگاه و محیط طبیعی، کوچک‌سازی این حسگرها ضروری است. یکی از روش‌های دستیابی به چنین هدفی به کارگیری روش استحصال و یا لایه نشانی مواد به روش چاپ جوهرافشان بوده که مزایای زیادی از جمله کاهش ضایعات تولیدی، سرعت بالا، دمای مناسب نشاندن مواد و غیره آن را به عنوان وسیله‌ای صنعتی جهت جایگزین کردن روش‌های چاپ شابلونی و فتولیتوگرافی در شکل‌گیری لایه‌های نازک (حسگرها) معرفی نموده است. در حقیقت روش جوهرافشانی امکان قرار دادن قطرات بسیار ریز مواد مختلف بر روی هر سطحی (شیشه، پلاستیک، فلز و غیره) با دقت و قابلیت تکراری بیش از چاپ شابلونی را می‌دهد. ساخت حسگرهای زیستی با استفاده از چاپگرهای جوهرافشان می‌تواند روشی سریع و اقتصادی و تا حدود زیادی دقیق برای ساخت آسان حسگر زیستی باشد. این حسگرها به عنوان مثال می‌توانند جهت تشخیص میزان قند خون و یا به منظور اندازه‌گیری غلظت الکل موجود در باز دم انسان مورد استفاده قرار گیرند.

۴-۲-۱- استفاده از چاپ جوهر افشان گرمایی برای ساخت حسگر قند خون

حسگر قند خون شکل ۵ به‌وسیله چاپ جوهرافشانی گرمایی و از طریق استحصال پی در پی جوهر الکترونیکی که شامل پلیمر رسانای PEDOT-PSS[3] می‌باشد و جوهر بیولوژیکی که شامل آنزیم GOD[4] می‌باشد بر روی زیر لایه ITO-Glass[5] ساخته شده است. به عنوان آخرین مرحله ساخت حسگر که برای جلوگیری از انحلال آنزیم GOD قرار گرفته بر لایه نازکی از پلیمر رسانا PEDOT/PSS در محیط آبی به انجام می‌رسد، لایه‌ای از پلیمر سلولز استات که ایجاد یک غشای نیمه تراوا[6] را بر سطح آنزیم می‌نماید بر روی آن نشانده می‌شود [۱۱].

[1] Biosensor
[2] Analytical
[3] Poly(3,4-ethylenedioxythiophene/Polystyrenesulfonic acid) (PEDOT/PSS)
[4] Glucose oxidase (GOD)
[5] Indium tin oxide
[6] Semi-permeable membrane

مقاله



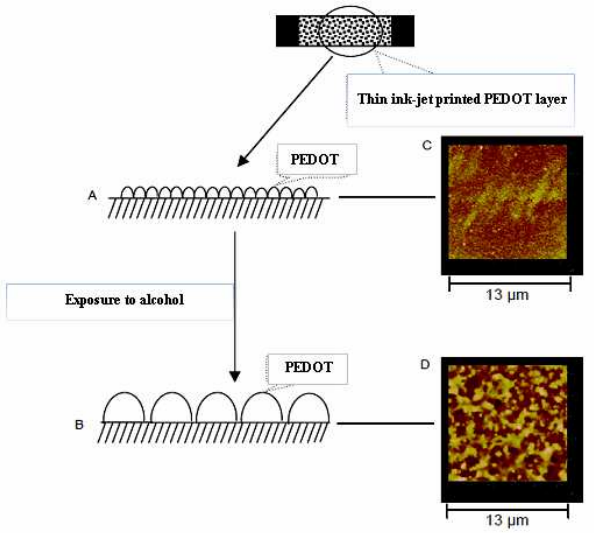
شکل ۵- نمایی کلی از حسگر قند خون تهیه شده با چاپگر جوهرافشان حرارتی [۱۱].

۴-۲-۲- کاربرد چاپ جوهرافشان در ساخت فیوزهای شیمیایی

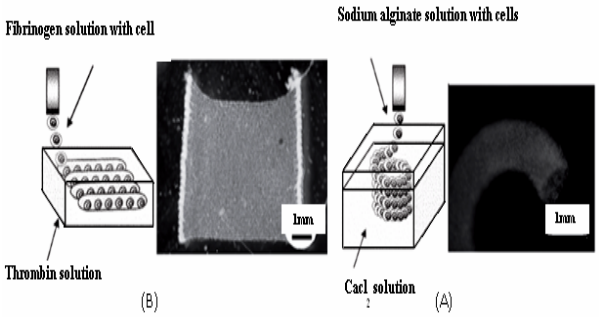
از پلیمر رسانای PEDOT-PSS در ساخت حسگرهای حس‌کننده حضور بخارهای آلی استفاده شده است. لایه نازکی از پلیمر رسانای فوق در حلال حل شده و یا در آب تعلیق شده و سپس بر سطح فیلمی از جنس پلی‌استر به روش جوهرافشان پاشیده می‌شود. در شکل ۶-A ، نمای کلی از نحوه قرارگیری یک لایه نازک PEDOT-PSS جوهرافشانی شده بر سطح بستر نمایش داده شده که پس از تماس با بخار حاوی الکل (شکل ۶-B)، این لایه پلیمر هادی متورم شده و باعث تغییر مقاومت الکتریکی آن شده و توسط قسمت حس‌کننده مقاومت الکتریکی حس شده و نهایتاً مورد پردازش قرار می‌گیرد. میزان تاثیر پذیرفتن لایه تهیه شده به روش فوق در هنگامی که با هوایی که دارای متانول در غلظت ۵۰۰ppm است به مدت ۳۰ دقیقه در تصاویر (D و C–۶) نمایش داده شده است. از کاربردهای مهم این لایه‌های نازک PEDOT-PSS چاپ شده، استفاده از آنها به عنوان فیوز شیمیایی، در وسایل یکبار مصرف قابل حمل جهت آگاهی از وجود بخارهای آلی تا حد تعریف شده‌ای از غلظت می‌باشد [۱۲].

۴-۳- کاربرد چاپ جوهرافشان در علوم زیستی

فناوری چاپ جوهرافشان قادر به قراردهی (کاشت) سلول‌های زنده، در وضوحی در حد میکرومتر و در آرایشی مشابه بافت‌های بیولوژیکی می‌باشد. اگر چه سلول‌های زنده به آسانی در معرض گرما صدمه می‌بینند ولی به کارگیری چاپگرهای جوهرافشان پیزویی امکان پاشش قطرات بسیار ریز جوهرهایی حاوی سلول‌های زنده معلق در خونابه یا هیدروژل[1] را بوجود آورده است. در عمل به جای جوهر چاپ، از هیدروژل‌های دارای سلول‌های زنده جهت ساخت نمونه‌های سه‌بعدی[2] مدل بافت استفاده شده که چنین فناوری و جوهرافشانی ریز کاشت با استفاده از سلول‌های زنده، عاملی ارزنده در پیشرفت مهندسی بافت بوده است. در تهیه ساختارهای بیولوژیکی معمولاً هیدروژل دارای سلول‌های زنده، جهت واکنش ژله‌ای شدن، توسط سامانه‌های جوهرافشان به داخل یک محلول واکنش دهنده پرتاب می‌شوند. در این روش، ریز قطرات پرتاب شده از نازل‌های جوهرافشان (بیو چاپگر[3] سه بعدی) ساختارهای کنترل شده‌ای از هیدروژل جامد شده را بصورت سه بعدی که شامل سلول‌های زنده هستند بوجود می‌آورند. روش تولید ساختارهای سه بعدی هیدروژل‌های سلولی به شکل‌های صفحه‌ای و لوله‌ای در شکل۷ نمایش داده شده است [۱۳،۱۴].



شکل ۶- نمایی کلی از چاپ فیوز شیمیایی لایه نازک PEDOT/PSS [۱۲].



شکل ۷- ایجاد ساختارهای سلولی لوله‌ای (A) و صفحه‌ای (B) بوسیله چاپ جوهرافشان [۱۴].

۴-۴- کاربرد چاپ جوهرافشان در صنعت الکترونیک

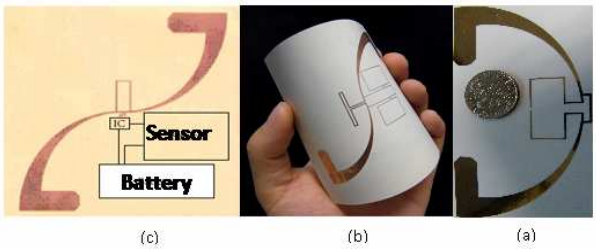
در ساخت اجزای الکتریکی و وسایل الکترونیکی پلیمری و آلی مانند خازن‌ها، ترانزیستورها، دیودها، سیستم‌های میکروالکتریکی- مکانیکی، آنتن‌ها و غیره تکنیک‌های مختلفی بکار می‌روند. از جمله می‌توان لیتوگرافی، تبخیر گرمایی[4]، چاپ شابلونی و چاپ جوهرافشان را نام برد. در میان این روش‌های متفاوت، چاپ جوهرافشان بیشتر از همه قابل توجه است زیرا ساخت نمونه همراه با استحصال و قرارگیری مواد بر روی بستر یعنی به صورت افزایشی شکل ۱ می‌باشد [۱۷-۱۵]. از جمله موارد

[1] Hydrogel
[2] Three dimensions
[3] Bioprinter
[4] Thermal Evaporation

به‌کارگیری چاپگرهای جوهرافشان در تولید تجهیزات الکترونیکی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۴-۴-۱- چاپ آنتن RFID به روش جوهرافشان

امروزه ضرورت شناسایی خودکار عناصر و جمع‌آوری داده‌های مرتبط با آنها بدون نیاز به دخالت انسان جهت ورود اطلاعات، در بسیاری از عرصه‌های صنعتی، علمی، خدماتی و اجتماعی احساس می‌شود. به مجموعه‌ای از فناوری‌ها که از آنان برای شناسایی اشیا، انسان و حیوانات توسط ماشین استفاده می‌گردد، شناسایی خودکار و یا به اختصار Auto ID گفته می‌شود. هدف اکثر سیستم‌های شناسایی خودکار؛ افزایش کارآیی، کاهش خطای ورود اطلاعات و آزادسازی زمان کارکنان برای انجام کارهای مهم‌تر نظیر سرویس‌دهی بهتر به مشتریان است. فناوری RFID[1] با استفاده از ارتباطات مبتنی بر بسامدهای رادیویی امکان شناسایی خودکار، ردیابی و مدیریت اشیا، انسان و حیوانات را فراهم می‌نماید [۱۸]. از تکنیک چاپ جوهرافشان جهت ساخت برچسب‌های RFID در محدوده طول موج UHF[2] بر روی زیر لایه‌های آلی [۲۱-۱۹] از جمله کاغذ و پلیمر بلور مایع با هزینه خیلی پائین، استفاده شود (شکل ۸).



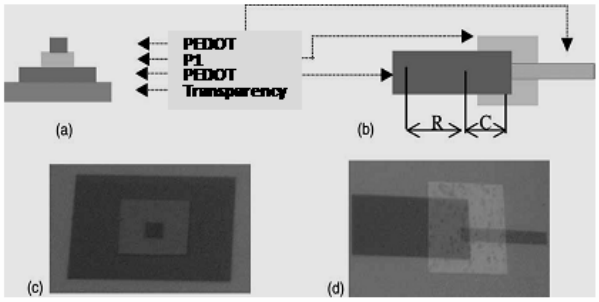
شکل ۸- چاپ آنتن بر روی زیر لایه (a) کاغذی (b) پلیمر بلور مایع (c) نمای کلی آنتن [۱۹].

از فناوری RFID در بسیاری از ساختمان‌های اداری و به منظور کنترل تردد کارکنان استفاده می‌گردد. یا فروشندگان کالا به منظور مراقبت الکترونیکی از محصولات خود در مقابل سرقت، از این فناوری استفاده می‌نمایند. برخی نهادهای دولتی نیز برای نظارت و کنترل متخلفین از فناوری فوق استفاده نموده‌اند [۲۱-۱۸].

۴-۴-۲- ساخت خازن تمام پلیمری به روش جوهرافشان

خازن عبارت است از دو صفحه موازی رسانا که بوسیله لایه‌ای از هوا یا عایق از هم جدا شده‌اند. خازن‌ها انرژی الکتریکی را نگه‌داری می‌کنند و به همراه مقاومت‌ها، در مداراها استفاده شده و همچنین از آنها برای یکنواخت نمودن نوسانات ولتاژ جریان‌های مستقیم بهره برده می‌شود [۲۲].

در ساخت خازن تمام پلیمری به روش جوهر افشانی، از پلیمر PEDOT/PSS با قابلیت رسانایی بالا به عنوان صفحات بالایی و پایینی استفاده می‌شود. شکل ۹-a سطح مقطع خازن تمام پلیمری را نشان می‌دهد. ابتدا، دو لایه از PEDOT بر روی زیر لایه چاپ شده که به عنوان صفحه پایینی عمل می‌نماید. هر لایه PEDOT پس از چاپ شدن بر سطح زیر لایه، در دمای ۵۰°C به مدت ۲ min خشک می‌گردد. بعد از چاپ لایه زیرین، سه لایه از PBPDA[3] بر روی لایه قبلی چاپ می‌شود. چاپ سه لایه از PBPDA باعث پر شدن حفره‌های ریز در لایه عایق شده و بدین گونه از اتصال کوتاه بین دو صفحه خازن جلوگیری می‌شود. شکل ۹-b صافی از خازن تمام پلیمری ساخته شده را نشان می‌دهد. سطح مؤثر خازن (همپوشانی سطح بین صفحه بالایی و صفحه پایینی) ۲×۲ mm می‌باشد. مدارهای صافی RC[4]، نیز با به کارگیری خازن‌های تمام پلیمری ساخته شده‌اند. شکل ۹-c طرحی از مدار RC را نشان می‌دهد که مقاومت آن از PEDOT:PSS ساخته شده است. شکل ۹-d صافی RC پلیمری چاپ شده را نشان می‌دهد. خازن‌های تمام پلیمری جهت مدارهای صافی RC پلیمری و همچنین در صنعت مدارهای مجتمع تمام پلیمری با هزینه پائین بکار برده می‌شوند [۲۳].



شکل ۹- خازن و RC ساخته شده بوسیله چاپ جوهرافشان [۲۳].

۴-۴-۳- چاپ جوهرافشان دیودهای ساطع کننده نور و نمایشگرهای PLED

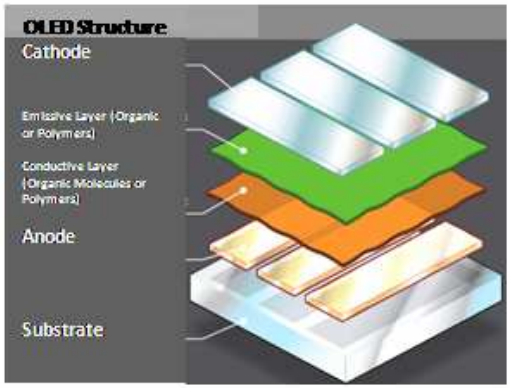
دیودها جریان الکتریکی را در یک جهت از خود عبور داده و در جهت دیگر در مقابل عبور جریان از خود مقاومت بالایی نشان می‌دهند که اصطلاحاً به آنها یکسو ساز می‌گویند [۲۴]. دیود ساتع‌کننده نور از نوع آلی (OLED)[5]، فناوری امیدبخش جدیدی در تولید نمایشگرهاست که مزایایی از جمله نازکتر و انعطاف‌پذیر بودن، مصرف انرژی و هزینه ساخت کمتر، وضوح تصویر بالا و زاویه دید بیشتری را به نمایشگرها می‌دهد. همچنین توان مصرفی کمتر OLEDs باعث شده که آنها را در ساخت وسایل قابل حمل مناسب سازد (شکل ۱۰).

دو روش عمده در ساخت OLEDs مورد استفاده قرار می‌گیرد: اول، فناوری ریزمولکول[6] OLED، که بر اساس لایه نشانی در محیط خلا عمل نموده و معمولاً از زیر لایه شیشه استفاده می‌کنند. روش دوم، به کارگیری چاپگرهای جوهرافشان است که قادرند مواد مورد نیاز برای ساخت دیودهای نوردهنده را بر بسترهای سخت و یا انعطاف پذیر قرار دهند.

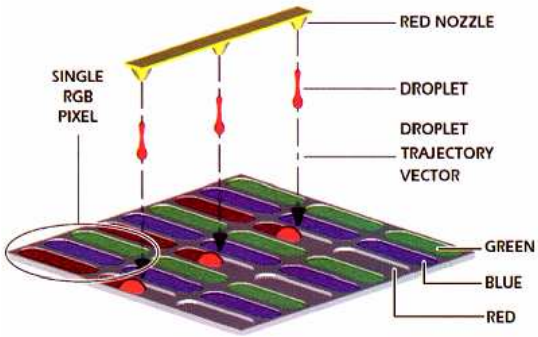
[1] Radio Frequency Identification
[2] Ultra-High Frequency
[3] Poly(BiphenyltetracarboxylicDianhydride-Co-Phenylenediamine)
[4] Resistance/Capacitor
[5] Organic light emitting diode
[6] Small molecule

مقاله

ساخت جوهرافشانی دیودهای نوردهنده بر بسترهای انعطاف‌پذیر امکان تولید نمایشگرهایی که مانند صفحه کاغذ لوله شده و یا انعطاف دارند را ممکن می‌سازد [۲۵].



شکل ۱۰- ساختار کلی دیود ساطع کننده نور [۲۵].

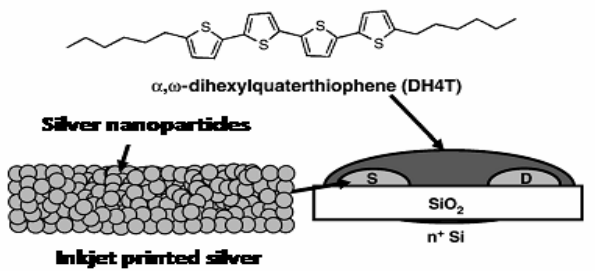


شکل ۱۱- قرارا دادن قطره‌های حاوی مواد نوردهنده پلیمری توسط چاپگر جوهرافشان بر سطح بستر ساخت نمایشگر [۲۶].

دیود ساتع کننده نور پلیمری (PLED)[1] نوعی از OLED است که مواد نور دهنده آن از نوع پلیمری بوده و چاپ جوهرافشان به عنوان بهترین روش تولید نمایشگرهای پیشرفته از این نوع دیودهای نوردهنده می‌باشد. در (شکل ۱۱)، استفاده از فرآیند جوهرافشانی در ساخت نمایشگر PLED نمایش داده شده است. در تولید جوهرافشانی نمایشگرهای PLED، چالش‌هایی نظیر دستیابی به فرمولاسیون‌های بسیار حساس جوهر مواد پلیمری به گونه‌ای که بتوان حجم از قبل تنظیم شده‌ای از جوهر، معمولاً چندین پیکولیتر، را در محل مشخصی بر روی زیر لایه قرار داد. کمترین تغییر در حجم قطره جوهرافشانی شده می‌تواند به صورت تغییرات روشنایی در سرتاسر نمایشگر PLED مشاهده شود [۲۶،۲۷].

۴-۴-۴- ساخت ترانزیستورهای لایه نازک با استفاده از فناوری جوهرافشان

ترانزیستور یکی از وسایلی است که از مواد نیمه رسانایی مانند سیلیسیم و ژرمانیم ساخته می‌شود. ترانزیستورها هنوز به صورت جداگانه استفاده می‌شوند ولی اکثریت آنها به صورت مدار مجتمع (به صورت مختصر IC و همچنین میکرو - چیپ نامیده می‌شوند) همراه با دیودها، مقاومت‌ها، خازن‌ها و دیگر قطعات الکترونیکی برای ساخت یک مدار کامل الکترونیک تولید و استفاده می‌شوند. اگر بخواهیم ساده به موضوع نگاه کنیم عملکرد یک ترانزیستور را می‌توان تقویت جریان دانست اگر چه موارد بسیاری هم وجود دارد که می‌توان از یک ترانزیستور برای تقویت ولتاژ استفاده کرد [۲۸-۳۰]. با استفاده از جوهررسانای حاوی نانو ذرات نقره، الکترودهای ترانزیستور لایه نازک آلی[2] مستقیماً به‌وسیله چاپ جوهرافشان ساخته شده‌اند. ذرات نانویی نقره به قطر ۲۰ nm جهت تولید مستقیم مسیرهای فلزی بکار می‌روند. جوهررسانای نقره بر روی زیرلایه قرص سیلیکان[3] به ضخامت ۲۰۰ nm از نوع n چاپ می‌شود. ترانزیستورهای لایه نازک آلی شکل ۱۲ با ریختن مذاب مواد نیمه رسانا مانند DH4T[4] (دی‌هگزیل۴ تایوفن) بین الکترودهای نقره تهیه شده به روش جوهرافشانی به نام‌های منبع و خروج[5] (ترمینال متصل به ترانزیستور) که ساخته می‌شوند [۳۱].



شکل ۱۲- نمای کلی از ترانزیستور لایه نازک آلی (OTFT) [۲۸].

۴-۴-۵- ساخت سلول خورشیدی به روش جوهرافشانی

سلول خورشیدی ابزاری است که انرژی خورشیدی را تحت اثر فتوولتاییک[6] به الکتریسته تبدیل می‌نماید. سلول‌های خورشیدی کاربرد بسیاری داشته و برای فراهم نمودن توان لازم دستگاه‌های مختلف مانند ماشین حساب و یا ادوات الکتریکی در محل‌های فاقد سیستم انتقال و توزیع برق مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۲-۳۳].

فرآیند چاپ جوهرافشان قابلیت ساخت سلول‌های خورشیدی پلیمری را داشته، که جایگزینی ارزان برای سلول‌های خورشیدی گران و متداول ساخته شده بر پایه سیلیکون می‌باشند. در شکل ۱۳ زیر لایه شیشه‌ای یا پلاستیکی انعطاف‌پذیر که با ITO روکش شده است، بوسیله PEDOT:PSS به ضخامتی در حدود ۱۰۰ nm چاپ جوهرافشانی می‌شود. سپس مخلوط پلیمری فولرین[7] حجیم شامل P3HT[8] به عنوان دهنده الکترون و مشتق فولرین PCBM[9] به عنوان گیرنده الکترون، به ضخامتی در حدود ۱۰۰ nm

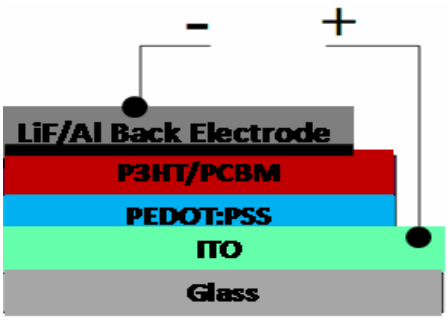
[1] Polymer Light Emitting Diode (PLED)

[2] Organic Thin Film Transistor (OTFT)
[3] Silicon wafer
[4] α,ω-dihexylquaterthiophene
[5] Drain
[6] Photovoltaic effect
[7] P3HT:C60
[8] Poly (3-hexylthiophene)
[9] [6, 6]-phenyl C61-butyric acid methyl ester

بر سطح لایه رسانای قبلی جوهرافشانی می‌گردد. نهایتاً لایه‌ای از LiF[1] به ضخامت ۱۰ A° بر روی لایه پلیمر- فولرین[2] حساس به نور به روش لایه نشانی در فاز بخار بر سطح لایه قبلی قرار داده شده و در نهایت با لایه‌ای از آلومینیوم به ضخامت ۱۰۰ nm بر روی LiF، جهت تشکیل الکترود پشتی لایه نشانی به روش تبخیر خلاء پوشیده شده و به این صورت ساخت سلول خورشیدی کامل می‌شود [۳۴].

۵- نتیجه‌گیری

چاپ جوهرافشانی یک روش نوین تولید دستگاه‌ها و اجزاء مختلف بوده که مزایائی چون: قابلیت تولید مستقیم طرح‌های هادی، غیرهادی و نیمه هادی را به صورت مستقیم و با کنترل دیجیتال، وضوح بالا در تولید طرح، کوتاه بودن زمان فرآیند، قیمت و ضایعات پایین، سادگی و فرآیند تمیز و با آلودگی کم را ارائه نموده است. در این روش از چاپ، به علت نبود تماس فیزیکی بین سامانه چاپ و زیر لایه، امکان استحصال مواد مختلف بر روی



شکل ۱۳- ساختار سلول خورشیدی آلی [۳۴].

زیرلایه‌های حساس و انعطاف‌پذیر میسر می‌باشد. همچنین ساخت نمونه در زمان استحصال مواد کامل شده و یا به عبارت دیگر ساخت نمونه به روش جوهرافشانی به صورت افزایشی می‌باشد. این روش در ساخت انواع قطعات الکترونیکی و همچنین بافت‌های زنده به کارگرفته شده که این روش چاپ مدرن را به عنوان بهترین جایگزین چاپ‌های متداول معرفی نموده است. استفاده از روش جوهرافشانی در تولید مواد و ابزار مختلف همراه با قابلیت‌های بسیار متنوع آن می‌تواند پاسخی به نیازهای روز افزون علوم و صنایع به روشی هوشمند و انعطاف‌پذیر در راستای تولید مصنوعات مختلف باشد.

۶- مراجع

1. P. Calvert, "Inkjet printing for materials and devices. Chem. Mater. 13, 3299-3305, **2001.**
2. B. Michel, "Printing Meets Lithography", American Institute of Physics, 16-19, **2002.**
3. P. Kiddell, C. Swift**,** "Principles of Digital Printing", <http://www.pdsconsulting.co.uk/2007/Library/Printing_Digital.asp>/ Viowed in **2011.**
4. M. Hutchings, "Inkjet printing in micro-manufacturing: opportunities and limitations", Institute for Manufacturing, Department of Engineering", University of Cambridge, Cambridge CB3 0FS, UK, 47-57, **2009**.
5. Y. Wang, J. Bokor, A. Lee, "Maskless Lithography Using Drop-On-Demand Inkjet Printing Method", Emerging Lithographic Technologies VIII, edited by R. Scott Mackay Proceedings of SPIE Vol. 5374, SPIE, Bellingham, WA, **2004.**
6. H. Ujiie, "Digital printing of textiles, 1st edition", Woodhead Publishing, **2006.**
7. S. M. Bidoki, D. Mc-Gorman, D. M. Lewis, M. Clark, G. Horler, R. E. Miles, "Inkjet Printing of Conductive Patterns on Textile Fabrics", The AATCC Rev, 5, 11-13, **2005**.
8. D. J. Tyler,"Textile Digital Printing Technologies",Textile Progress (The textile Institute), 10 ,1-64, **2005**.
9. S. M. Bidoki, J. Nouri, A. A. Heidari, "Inkjet deposited circuit components", J. Micromech. Microen, 17, 967–974, **2007**.
10. M.Chaplin,"Whatare biosensors", <http://www1.lbu.ac.uk/biology/enztech/biosensors.html/ Viewed in **2004**.
11. L. Setti, A. Fraleoni-Morgera, B. Ballarin, A. Filippini, D. Frascaro, C. Piana, "An amperometric glucose biosensor prototype fabricated by thermal inkjet printing" Biosens. Bioelectron., 20, 2019-2026, **2005**.
12. M F. Mabrook, C. Pearson, M. C. Petty,"An inkjet-printed chemical fuse", J. Phys., Conf. Ser., 15, 39–44, **2005**.
13. M. Nakamura, A. Kobayashi, F. Takagi, A. Watanbe, Y. Hiruma, K. Ohuchi, Y. Iwasaki, M. Horie, I. Morita, S. Takatani, "Biocompatible Inkjet Printing Technique for Designed Seeding of Individual Living Cells", Tissue Engineering, 11, 11/12 ,1658-1667, **2005**.
14. C. Henmi, M. Nakamura, Y. Nishiyama, K. Yamaguchi, S. Mochizuki, K. Takiura, H. Nakagawa, "Development of an effective three dimensional fabrication technique using inkjet technology for tissue model samples", Proc. 6th World Congress on Alternatives & Animal Use in the Life Scie, Tokyo, Japan, AATEX 14, Special Issue, August 21-25, 689-692, **2007**.
15. K. Cheng, M. H. Yang, W. W. W. Chiu, C. Y. Huang, J. Chang, Y. Yang, "InkJet printing self-assembled polyelectrolytes, and electroless plating: Low cost fabrication of circuits on a flexible substrate at room temperature", Macromol. Rapid Commun; 26, 247–264, **2005**.
16. Kamyshny, M. Ben-Moshe, S. Aviezer, S. Magdassi, "Inkjet printing of metallic nanoparticles and microemulsions", macromol. Rapid Commun., 26, 281–288, **2005**.
17. H. H. Lee, K. S. Chou, K. C. h. Huang, "Inkjet printing of nanosized silver colloids", Nanotechnology, 16, 2436–2441, **2005**.
18. L. Dearden, P. J. Smith, D. Y. Shin, N. Reis, B. Derby, P. O'Brie, "A low curing temperature silver ink for use in inkjet printing and subsequent production of conductive tracks", Macromol. Rapid Commun., 26, 315–318, **2005**.
19. Sakharavesh Company, "What is RFID?", Viewed in **2003**, <http://www.srco.ir/Articles/TipsView.asp?ID=574>, **2003**.
20. L.Yang, A. Rida, R. Vyas, M. M. Tentzeris, "Novel, enhanced-cognition", RFID architectures on organic/paper low-cost substrates utilizing inkjet technologies", International J. Antennas and Propagation, vol 2007, Article ID 68385, **2007**.
21. S. Molesa, D. R. Redinger, D. C. Huang, V. Subramanian, "High-quality inkjet-printed multilevel interconnects and inductive components on plastic for ultra-low-cost RFID applications", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 769, H8.3.1-H8.3.6, **2003**.
22. D. Redinger, S. Molesa, S. Yin, R. Farschi, V. Subramanian, "An inkjet-deposited passive component process for RFID",

[1] Lithium Fluoride
[2] Polymer-fullerene

IEEE transactions on electron devices, 51, 1978-1983**, 2004**.

23. Capacitor. Taken from Wikipedia, the free encyclopedia, Viewed in **2011**, <http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>, **2011**.
24. Y. Liu, T. Cui, K. Varahramyan, "All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique", Solid-State Electronics, 47, 1543-1548, **2003**.
25. Diode, "Wikipedia, the free encyclopedia", Viewed in **2011**, <http://en.wikipedia.org/wiki/Diode>, **2011**.
26. C. Summitt, "OLED Fabrication for Use in Display Systems", Viewed in **2009,** <www.u.arizona.edu/~crs2/OLED.pdf> **2009**.
27. J. Halls, "Ink-Jet Printing of PLED Displays", nformation Display 2/05, Viewed in **2005**, http://www.tinhoahoc.com/Semiconductor/IJ.PLED1pdf /**2005.**
28. M. A. Randolph, "Commercial Assessment of Roll-to-Roll Manufacturing of Electronic Displays", MSc Thesis, Massachusetts Institute of Tech., **2006**.
29. Transistor. Taken from Wikipedia, the free encyclopedia, Viewed in **2011**, http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor /**2011**.
30. P.C. Chang, S. E. Molesa, A. R. Murphy, J. M. J Frechet, V. Subramanian "Single monolayer inkjetted oligothiophen organic TFTs exhibiting high performance and low leakage" J. A. m, Chem., Soc., 126, 1596-1597, **2004**.
31. S. K. Volkman, S. Molesa, B. Mattis, P.C. Chang, V. Subramanian, "Inkjetted organic transistors using a Novel pentacene precursor", Mat, Res. Soc. Symp. Proc., 769, H11.7.1-H11.7.6**, 2003**.
32. D. Kim, S. Jeong, S. Lee, B. K. Park, J. Moon, "Organic thin film transistor using silver electrodes by the ink-jet printing technology", Thin Solid Films, 515, 7692–7696, **2007**.
33. Solar Cell, "Wikipedia, the free encyclopedia", Viewed in **2011,** <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell>, **2011**.
34. T. Kaydanova, A. Miedaner, C. Curtis, J. Perkins, J. Alleman, D. Ginley, "Inkjet printing approaches to solar cell contacts". presented at the national center for Photovoltaics and Solar Program Review Meeting Denver, 24-26, Colorado, **2003**
35. V. G. Shah, D. B. Wallace, "Low-cost solar cell fabrication by drop-on-demand Inkjet Printing", Pro. IMAPS 37th Annual International Symposium on Microelectronics, Long Beach, 14-18, Canada**, 2004**.