



# 图解

# OLED显示技术

田民波 编著

TUJIE  
OLED  
XIANSHI  
JISHU



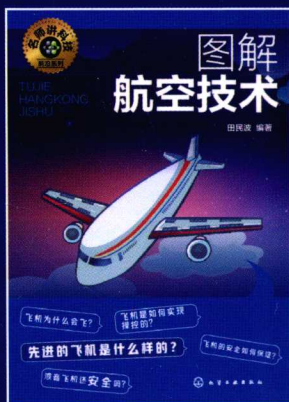
折叠屏来了！  
这到底是怎么实现的？

OLED是什么？  
有机电致发光二极管。

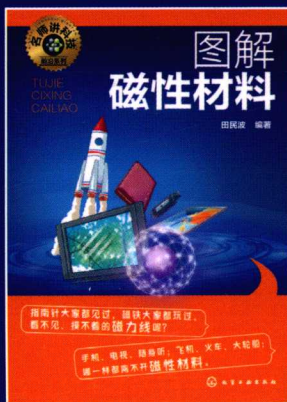
OLED最大特点是什么？低功耗、高效能、可弯曲……

OLED可以做什么？  
电视、手机、显示器、节能灯……

 化学工业出版社



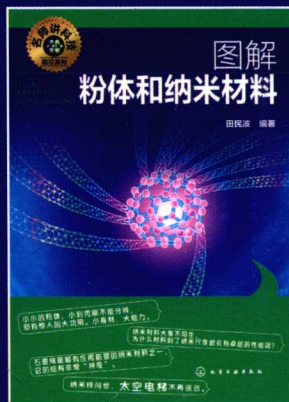
书号：978-7-122-33687-3  
定价：49.00元



书号：978-7-122-33088-8  
定价：49.00元



书号：978-7-122-33676-7  
定价：49.00元



书号：978-7-122-33611-8  
定价：49.00元



书号：978-7-122-33960-7  
定价：49.00元



书号：978-7-122-34377-2  
定价：49.80元

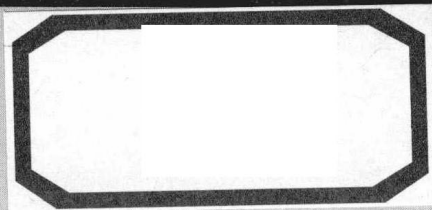
销售分类建议：科普

ISBN 978-7-122-34377-2



9 787122 343772 >

定价：49.80元



图解

TUJIE  
OLED  
XIANSHI  
JISHU

# OLED显示技术

田民波 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

“名师讲科技前沿系列”是作者在清华大学长期授课教案的归纳和扩展。《图解 OLED 显示技术》是其中的一个分册，内容包括 OLED 发展简介、OLED 如何实现发光和显示、如何提高 OLED 的发光效率、OLED 的结构和材料、OLED 是如何制造的、OLED 的现状和未来等，涉及 OLED 的方方面面。

针对 OLED 的入门者、制作者、研究开发者等多方面的需求，本书在汇集大量资料的前提下，采用图文并茂的形式，全面且简明扼要地介绍 OLED 的新工艺、新进展、新应用。可作为化学、材料、微电子、显示技术、精密仪器等学科学生和技术人员参考。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

图解 OLED 显示技术 / 田民波编著. —北京 : 化学工业出版社, 2019. 8

(名师讲科技前沿系列)

ISBN 978-7-122-34377-2

I. ①图… II. ①田… III. ①电致发光—发光器件—图解 IV. ①TN383-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 081034 号

---

责任编辑：邢 涛

文字编辑：陈 喆

责任校对：王鹏飞

装帧设计：王晓宇

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 装：北京新华印刷有限公司

880mm×1230mm 1/32 印张9 字数307千字 2019年10月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询：010-64518888

售后服务：010-64518899

网 址：http://www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：49.80元

版权所有 违者必究

# 前 言

白川英树、艾伦·黑格、艾伦·马克迪尔米德因发现导电高分子而获得 2000 年诺贝尔化学奖。有机发光二极管 (OLED) 的发明无论在理论上还是在实际应用上都具有划时代意义。

在人们的印象中,有机材料可被利用的电气功能几乎都是被动的 (Passive),包括绝缘性和介电性。今天,塑料作为结构材料在我们身边几乎无处不在,但由于其不导电,在电气和电子领域难以发挥核心和关键作用。

最早被利用的有机能动 (Active) 材料也许是光刻胶,它已成为支撑现代集成电路产业中光刻技术的基础材料。光刻胶,即感光材料,利用其光照射部分与未照射部分在溶液中的溶解度差异而刻蚀出电路图形。但是,光刻胶在最终产品中并无残留。

稍晚于光刻胶,人们开发出真正意义上的能动电子器件——OLED,并于 1997 年实现了商品化。从任职于柯达公司的美籍华人邓青云博士 1987 年发表论文算起,正好经过了 10 年。

1997 年人们正在开发利用无机材料的半导体发光二极管 (LED) 及无机 EL 等发光器件。通常情况下,在已有同类产品存在的情况下,除非在克服其缺点或降低价格方面具有明显优势,否则难以进入市场。当时,蓝光 LED 仍在开发之中,强度及光色都不够理想;同属面发光体的无机 EL 的发光也相当暗。在这种背景下,受益于基础研究方面的雄厚积蓄,OLED 在 10 年的时间内实现了商品化。2007 年 11 月日本索尼公司最早将 OLED 电视投入市场。又经过 10 多年努力,目前 OLED 面临难得的发展机遇。

基于以下优势,OLED 被认为是 TFT LCD 替代 CRT 后显示领域的又一次重大变革。

- ① 主动发光,无需背光源,利于实现器件的低功耗、超薄、柔性等目标。
- ② 低功耗,能有效提高移动设备的使用时间和待机时间。
- ③ 响应速度快,能及时捕捉到动态画面的每一个细节,无拖尾现象。
- ④ 超薄且超轻,若采用聚合物基板,可充分展现便携性、柔性和可弯曲性。
- ⑤ 宽温度特性,在很低的温度下能正常运行,可满足特殊需求。
- ⑥ 高对比度和宽视角,尤其是高分辨率,这些优点带来良好的视觉体验。

除了显示领域的应用外,OLED 在固态照明领域的应用也具有极好的前景。OLED 照明具有能大面积制作,用印刷方式生产等优势,可大幅降低制造成本;任意形状、可透明化、搭配软性基板具有可弯曲性 (柔性);效能高,是面发光,亮度色温可调,光质更接近于白炽灯,光色柔和,其光谱是目前所有光源中最接近太阳光的,而且不含紫外线等,一问世便引起关注。

目前的现状是,一方面 OLED 正日益广泛、深入和快速地理

用到现代社会的各个领域，而另一方面，人们对 OLED 的了解，对其本质的认识却不够深入，一知半解的不少。由于涉及大量尖端技术，难度极高，且 OLED 制作封闭于“与世隔绝”的超净工作间，普通人很难了解其中的奥妙。由于多学科交叉，即使某一学科的专家，也难以做到“一专百通”。面对涉及面广、发展快、内容新的 OLED 技术，迫切需要深入浅出、通俗易懂的“科普”读物。

《图解 OLED 显示技术》是“名师讲科技前沿系列”中的一个分册。内容包括 OLED 发展简介、OLED 如何实现发光和显示、如何提高 OLED 的发光效率、OLED 的结构和材料、OLED 是如何制造的、OLED 的现状和未来等，涉及 OLED 的方方面面。

本书在汇集大量资料的前提下，采用图文并茂的形式，全面且简明扼要地介绍 OLED 工作原理，OLED 材料、制作工艺、OLED 的新进展、新应用及发展前景等。采用每章之下“书角茶桌”的论述方式，前文后图，图文对照，并给出“本节重点”。以资料满载的方式，献给在 OLED 及相关产业领域的读者，帮助他们了解 OLED 技术的全貌。同时也以技术推移和最尖端为焦点，对今后的发展进行了展望和预测。

本书可作为化学、材料、微电子、显示技术、精密仪器等学科学生及技术人员参考。

本书得到清华大学本科教材立项资助并受到清华大学材料学院的全力支持。原稿承蒙段炼教授审阅，并采纳了他的宝贵意见，在此表示衷心感谢。

OLED 涉及化学、材料、电路、设计、制作、封装、测试等各个方面。作者水平有限，不妥之处恳请读者批评指正。

田民波

# 目 录

## 第 1 章 OLED 发展简介

1.1 OLED 成功发光的关键——采用超薄膜和多层结构	2
1.1.1 OLED 的发明和实用化的历史	2
1.1.2 OLED 成功发光的关键 ——“超薄膜”和“多层结构”	4
1.1.3 OLED 的原理及特征	6
1.1.4 OLED 器件的多层结构	8
1.1.5 OLED 器件中所用的材料系列	10
1.1.6 OLED 器件的高性能化	12
1.1.7 色素掺杂在 OLED 中的应用	14
1.2 OLED 的进展和发展前景	16
1.2.1 决定 OLED 特性的各种因素	16
1.2.2 如何高效率取出光	18
1.2.3 超高效率白光 OLED 屏	20
1.2.4 OLED 显示器难得的发展机遇	22
1.3 OLED 的发光原理 ——载流子注入、复合、激发和发光	24
1.3.1 无机 EL 的发光原理	24
1.3.2 半导体 LED 的发光原理	26
1.3.3 原子、分子的激发和退激发光	28
1.3.4 OLED 的发光原理	30
1.3.5 有机材料中为什么会有电流流动	32
1.3.6 OLED 发光的基本物理过程	34
1.3.7 载流子注入复合发光的原理	36

## 书角茶桌

最优显示技术和效果 .....	38
-----------------	----

## 第2章 OLED 如何实现发光和显示

2.1 有机材料电致发光的原理 .....	40
2.1.1 关于价带、HOMO 和氧化电位 .....	40
2.1.2 半导体和能带图 .....	42
2.1.3 磷光与荧光的不同 .....	44
2.2 载流子的注入和迁移 .....	46
2.2.1 由电极的载流子注入 .....	46
2.2.2 键合力及载流子在有机分子间的迁移 .....	48
2.2.3 载流子迁移率的测量方法 .....	50
2.2.4 何谓空间电荷限制电流? .....	52
2.3 有机半导体和导电高分子 .....	54
2.3.1 有机半导体与导电高分子 .....	54
2.3.2 有机材料的P型和N型 .....	56
2.3.3 光吸收与发光 .....	58
2.3.4 如何评价OLED发出的光 .....	60
2.3.5 关于辉度和照度 .....	62
2.3.6 光与色的关系 .....	64
2.3.7 OLED用材料依用途不同而异 .....	66
2.4 有机半导体电致发光材料 .....	68
2.4.1 发光材料有小分子、高分子材料之分 .....	68
2.4.2 代表性的发光材料 .....	70

2.4.3	小分子发光材料的结构及发光机制	72
2.4.4	能量转移和载流子捕获	74
2.4.5	色素掺杂系统中激发能从分子到分子的转移	76
2.4.6	导电性为高分子发光材料所必需	78

## 书角茶桌

OLED 与能量的单位	80
-------------	----

## 第 3 章 如何提高 OLED 的发光效率

3.1	如何提高光取出效率	82
3.1.1	表示发光效率的外部量子效率	82
3.1.2	对发光效率有重大影响的 PL 量子效率	84
3.1.3	必须提高光取出效率	86
3.1.4	光的干涉也会起作用	88
3.2	影响发光效率的因素	90
3.2.1	从空穴与电子复合直到发光的过程	90
3.2.2	OLED 的发光效率	92
3.2.3	有机 EL 的能带模型	94
3.3	OLED 器件用荧光发光材料	96
3.3.1	空穴传输材料的分子结构及玻璃化转变温度 ( $T_g$ )、 离化能 ( $I_p$ ) 的数据	96
3.3.2	用于 OLED 元件的电子传输材料	98
3.3.3	OLED 荧光发光体系: 主体 + 掺杂剂 (客体)	100
3.3.4	OLED 用荧光性主 (Host) 发光材料	102
3.3.5	OLED 用荧光性客 ( $G_{\text{uest}}$ ) 发光材料	104

3.4	荧光与磷光的区别	106
3.4.1	荧光发光和磷光发光	106
3.4.2	三阶降落发出“荧光”，二阶降落发出“磷光”	108
3.4.3	电子自旋方向决定激发状态是单线态还是三线态	110
3.4.4	关于“荧光”和“磷光”	112
3.5	OLED 器件用磷光发光材料	114
3.5.1	金属配合物系磷光发光材料	114
3.5.2	OLED 用铱 (Ir) 系金属配合物磷光发光材料	116
3.5.3	量子点显示	118
3.5.4	PLED 用 FIrpic 衍生物和聚芴衍生物	120
3.5.5	高分子空穴注入材料及阳极材料	122
3.6	磷光发光和延迟荧光发光	124
3.6.1	主材料及客材料的激发能与发光的关系	124
3.6.2	磷光主材料的激发三线态能量	126
3.6.3	最早研究的磷光材料	128
3.6.4	利用延迟荧光也可使激子生成效率达 100%	130

## 书角茶桌

	有机材料的成本及关键制作工艺	132
--	----------------	-----

## 第 4 章 OLED 的结构和材料

4.1	分层结构及高效率 OLED 器件	134
4.1.1	功能分离积层型元件结构	134
4.1.2	能隙主材料、电子传输材料，热活化 延迟荧光发光材料	136
4.1.3	高效率磷光蓝光元件和白光 OLED 元件	138

4.1.4	多光子发生器件(堆叠型器件)和交流驱动 OLED	140
4.1.5	低电压磷光 OLED 元件	142
4.2	载流子注入、传输和阻止材料	144
4.2.1	载流子注入材料	144
4.2.2	常用的载流子传输材料	146
4.2.3	防止空穴穿透的载流子阻止材料	148
4.3	OLED 器件用电极材料	150
4.3.1	小分子系无源驱动型 OLED 器件的结构	150
4.3.2	取出光的透明电极	152
4.3.3	阳极材料——IZO 与 ITO 的比较	154
4.3.4	阴极金属和功函数	156
4.4	OLED 器件的彩色化方式	158
4.4.1	彩色显示不可或缺的 RGB	158
4.4.2	OLED 彩色化方式的比较	160
4.4.3	三色独立像素方式(三色分涂方式)	162
4.4.4	彩色滤光片(CF)方式	164
4.4.5	色变换(CCM)方式	166
4.5	OLED 器件的驱动	168
4.5.1	矩阵方式显示器驱动扫描方式的种类	168
4.5.2	无源矩阵(简单矩阵)驱动方式	170
4.5.3	有源矩阵驱动方式	172
4.5.4	无源矩阵和有源矩阵两种驱动方式的对比	174

## 书角茶桌

热活化延迟荧光(材料)	176
-------------	-----

## 第5章 OLED是如何制造的

- 5.1 OLED器件的制作工艺(1)——制作工艺流程·····178
  - 5.1.1 小分子系无源矩阵驱动型全色 OLED 的制作  
工艺流程·····178
  - 5.1.2 前处理,成膜和封装·····180
  - 5.1.3 PMOLED和AMOLED的制作工艺流程·····182
  - 5.1.4 从群集式到直列式蒸镀装置的过渡——可以缩短  
生产节拍(间隔)时间的直线式生产线·····184
  - 5.1.5 利用条状阴极障壁兼作掩模制作像素阵列·····186
  - 5.1.6 利用条状阴极障壁的无源驱动 OLED 元件的像素结构·····188
- 5.2 OLED器件的制作工艺(2)——蒸镀成膜·····190
  - 5.2.1 容易控制膜厚的真空蒸镀法·····190
  - 5.2.2 OLED元件制作中蒸镀成膜的特殊性·····192
  - 5.2.3 热壁(Hot Wall)蒸镀法与普通点源蒸镀法的对比·····194
  - 5.2.4 不断进化中的真空蒸镀法·····196
  - 5.2.5 主材料和客材料的共蒸镀——色素掺杂法·····198
  - 5.2.6 引入辅助发光(EA)掺杂剂的发光系统·····200
  - 5.2.7 利用遮挡掩模分涂RGB三原色有机色素·····202
  - 5.2.8 OLED各种膜层的蒸镀成膜·····204
  - 5.2.9 透明电极的形成与溅射法·····206
- 5.3 OLED器件的制作工艺(3)——量产系统·····208
  - 5.3.1 小分子系 OLED 量产系统的一例·····208
  - 5.3.2 小分子系 OLED 量产制造装置及流程·····210
  - 5.3.3 小分子系 OLED 量产制造工艺过程·····212

5.3.4	OLED、PLED——材料和结构均不同的 两种有机 EL 器件 .....	214
5.4	PLED 器件的制作工艺(4)——喷墨印刷 .....	216
5.4.1	由溶液制作薄膜的涂布法 .....	216
5.4.2	何谓印刷电子 .....	218
5.4.3	喷墨法形成图形 .....	220
5.4.4	喷墨法制作 RGB 像素单元 .....	222
5.4.5	印刷法制作 OLED 元件简介 .....	224
5.4.6	凹版印刷法制作大尺寸 OLED .....	226
5.4.7	PLED 的量产系统 .....	228
5.4.8	制作大屏用的激光转印法 .....	230
5.5	OLED 器件的制作工艺(5)——OLED 的封装 .....	232
5.5.1	OLED 和 PLED 的制作工艺流程 .....	232
5.5.2	至关重要的封装和干燥剂 .....	234
5.5.3	正常发光和黑点缺陷 .....	236
5.5.4	封装用金属封装罐的自动供应线 .....	238
5.5.5	封装膜封装的成膜工艺和封装方式 .....	240

## 书角茶桌

OLED 与 TFT LCD 的竞争 .....	242
--------------------------	-----

## 第 6 章 OLED 的现状和未来

6.1	OLED 的改进——上发光型面板和全色像素 .....	244
6.1.1	OLED 需要开发的技术课题 .....	244
6.1.2	下出光方式和上出光方式 .....	246

6.1.3	下出光型和上出光型面板的对比	248
6.1.4	SOLED 的全色像素技术与发光时间控制电路技术	250
6.1.5	铟镓锌氧化物 (IGZO) 薄膜晶体管驱动	252
6.1.6	IGZO 薄膜三极管驱动的优势	254
6.2	OLED 将与 LCD 长期共存	256
6.2.1	轻量、柔性 OLED 器件	256
6.2.2	OLED 的技术发展和产业化现状	258
6.2.3	柔性 OLED 器件的耐弯折特性	260
6.2.4	柔性显示器应具备的条件	262
6.2.5	极薄型壁挂式 OLED 显示器	264
6.2.6	无时不有、无处不在的显示器	266
6.2.7	OLED 与 LCD 长期共存, 共同发展	268

## 书角茶桌

如何理解“半导体显示”	270
-------------	-----

参考文献	272
------	-----

作者简介	273
------	-----

## 1.1 OLED 成功发光的关键 ——采用超薄膜和多层结构

### 1.1.1 OLED 的发明和实用化的历史

有机 EL，即有机电致发光，其概念是相对于无机 EL (Electro Luminescence) 而言的，指电流通过有机材料而产生发光的现象。近些年来，欧美和中国业界多使用 OLED (Organic Light Emitting Diode，有机发光二极管) 的称呼指代有机电致发光或显示器，而日本学者至今多称其为有机 EL，可能是由于二者侧重点不同：OLED 更强调“发光二极管”的特征；有机 EL 则更强调“有机电致发光”的特性。为论述方便，本书中这两个名称通用。

有机 EL 尽管在名称上与无机 EL 更为相似，但前者在发光原理上是有别于后者的电致发光，而是与半导体 LED 的发光原理相同。无机 EL 的电致发光属于本征 EL，而有机 EL (OLED) 与半导体 LED 同属于载流子注入型，因此也称为注入型 EL。关于三者的区别请见 1.3 节。下面先简要回顾电致发光及器件的发展史 (见图 1-1)。

上述三类器件中，最早是在 1923 年发明的半导体 LED。无机 EL 稍微晚一些，于 1936 年发明。

有机电致发光元件的研究起始于布里奇曼 (Bridgman) 法有机单晶的制作，20 世纪 50 年代后期以后，研究继续进行。有人采用 LB 膜，将小分子先在水面上展开，再将其移至基板表面，便可得到单分子膜。若能做出高纯度的单晶，将其解理 (劈开)，两侧装上电极，外加电压，便可以观察到电致发光。但是，单晶解理得到的试样厚度较厚，大致在毫米量级，最薄也在数百微米，要想实现  $1\text{MV}/\text{cm}$  左右的电场，需要非常高的电压。

外加高电压，不仅在试样中，而且在试样外部也会产生电场，从而产生流经试样外部的电流 (表面漏电流)。最终，由于试样表面严重放电，致使试样内部不能施加所需要的电压。为了解决这一难题，尝试将试样减薄以降低外加电压，采用薄膜的方法，但发光强度远不能满足要求。正当世界范围内的研究“山穷水尽疑无路”时，1987 年邓青云博士发表的开创成果给人们送来“柳暗花明又一村”。

- (1) 由电能变换为光能的方式有哪些。
- (2) 简述无机 EL、LED、有机 EL (OLED) 的发展史。
- (3) 请分析至今仍存在“OLED”和“有机 EL”两种名称的原因。

图 1-1 电致发光及器件的发展史

年	无机 EL	半导体 LED	有机电致发光元件 (OLED)
1923		SiC 单晶的 EL	
1936	发自 ZnS 粉末的 EL		
1952	面状光源的发表 (美国希尔弗尼亚公司)	Ge pn 结的红外发光	
1953			锰酸盐的发光
1955		GaP 的橙色发光	
1956			(Bridgeman 法制成有机单晶)
1959			萘单晶的 EL
1962		LED 的发明 (N.Holonyak)	
1967	两层绝缘层结构的提出		
1968		GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> 红光 LED 的制品化 (美 GE 公司)	
1974		GaP: N 绿光 LED 的制品化	
1983	橙黄色屏制品化 (日夏普)		PVCz 铸型膜的 EL
1985		低温缓冲层导入	
1987			Tang&VanSlyke 的文章 (Alq <sub>3</sub> 的 EL)
1989		SiC 蓝光 LED 发表 pn 型 GaN 蓝光 LED 的发表	Tang 色素掺杂元件发表
1990			PPV 的 EL 的发表
1992			高辉度蓝光有机 EL 的发表 (出光興産)
1993		InGaN/AlGaIn 高辉度蓝光 LED 发表	
1994		全色 LED 系统的实用化	
1995		蓝光半导体激发的发表	
1997			绿光有机 EL 制品化 (先锋公司) 利用光变换的彩色显示器 (出光興産)
1998			RGB 并置的彩色显示器 (先锋公司)
1999	彩色显示器制品化 (iFire)	蓝光半导体激光器制品化	白色 + 滤色膜的彩色显示器 (TDK)
2000			[ 诺贝尔化学奖 (导电性高分子) ]
2003			AM 方式的商品化 (SKD)
2005	显示器开发中止		40 in 显示器 (Samsung)
2007			有机 EL 电视商品化 (索尼)
2009			155 in 有机 EL 显示器 (三菱电机 · 先锋)
2010			OLED 电视商品化 (三菱电机 · 先锋)
2012			55 in 有机 EL 电视 (Samsung, LG) 有机 EL 照明屏的面市 (各公司)
2013			56V 型 4K 有机 EL 电视开发 (索尼) 55 in 有机 EL 电视面市 (Samsung, LG)
2014		诺贝尔物理学奖 (蓝光 LED)	55 in 4K 有机 EL 电视面市 (LG)

## 名词解释

LED: Light-Emitting Diode 的缩略语。原指无极发光二极管, 而 OLED 指有机发光二极管。

劈开: 解理。使单晶体由容易分割的晶面分开。金刚石也可由解理面简单地劈开。

LB 膜: Langmuir-Blodgett 膜的简称。一般是先在水面上展开, 再将其移至基板表面, 便可得到单分子膜。

## 1.1.2 OLED 成功发光的关键 ——“超薄膜”和“多层结构”

有机电致发光的研究起始于 20 世纪 50 年代，W. Helfrich 等人于 60 年代观测到直流电场下的有机电致发光，并基本上确定了电荷注入型 EL 的概念。尽管这被认为是有机 EL 发光的最初成果，但早期的有机电致发光技术停留在高驱动电压、低亮度、低效率的水平上，有机 EL 投入实际应用仍不切实际，这使得有机 EL 的研究工作一直没有得到重视。直到 1987 年，任职于美国柯达公司的邓青云博士等人发表了以真空镀膜法制成多层膜结构的 OLED 组件，大幅提高了有机 EL 性能后，才掀起了此领域的研究热潮。

邓青云博士等人于 1983 年申请专利的有机 EL 元件原型如图 1-2 所示。由于有机 EL 元件原型中的膜层可以做到极薄，使其流过电流需要施加的电压大大降低，同时膜层质量极高、无针孔，再加上发光层采用两层结构而不是一层结构，因此可靠性及寿命大大提高。此外，超薄膜结构还可以尽量保证发光层发出的光透射到外部而不是被器件本身吸收。

由此可以看出，OLED 成功发光的关键就在于由邓青云博士等人提出并实现的“超薄膜”“多层结构”创意。这些设计仍然是现在人们进行有机 EL 开发的基础。后人所称的“柯达专利”就主要包括“超薄膜”“多层结构”等内容。

图 1-3 所示为最早由柯达公司和九州大学发表的小分子空穴传输材料，给出了分子结构、玻璃化温度 ( $T_g$ )、离化势 ( $I_p$ ) 等。最早开发的材料因玻璃化温度太低而限制了实际应用，但此后成功应用的材料都是在此基础上发展起来。选择材料和器件的关键指标是发光效率和工作寿命。

- (1) 今日的有机 EL (OLED) 与过去的有机场致发光器件有何差异。
- (2) 发光层厚度若达毫米量级会引发何种问题。
- (3) 邓青云博士首先对 OLED 获得突破的关键是什么。