

| | |
|------------------|--|
| 題名 | 有機EL ディスプレイ技術の進化 |
| Title | Evolution of OLED Display Technology |
| 著者名 | チン・W・タン |
| Author(s) | Ching W. Tang |
| 言語 Language | 日本語・英語 Japanese, English |
| 書名 | 稲盛財団：京都賞と助成金 |
| Book title | The Inamori Foundation : Kyoto Prizes & Inamori Grants |
| 受賞回 | 35 |
| 受賞年度 | 2019 |
| 出版者 | 公益財団法人 稲盛財団 |
| Publisher | The Inamori foundation |
| 発行日 Issue Date | 10/31/2019 |
| 開始ページ Start page | 106 |
| 終了ページ End page | 139 |
| ISBN | 978-4-900663-35-0 |

有機 EL ディスプレイ技術の進化

チン・W・タン

稲盛財団よりこのような大変名誉ある賞をいただき感謝いたします。今日、私は有機EL(OLED)ディスプレイ技術の進化についてお話しします。OLEDとはOrganic Light-Emitting Diodes(有機発光ダイオード)の略です(日本では主に有機EL(素子)として知られている)。これからお話することは、いろいろな意味で、私の人生という旅を振り返ることになります。

私は香港で生まれました(Fig. 1)。香港は約20マイル四方の小さな行政区です。活気があって美しい街——光の街——で、夜になると港が美しい光で彩られます。残念なことに、ここ数カ月ほど、街頭で時には暴力的ともいえる抗議デモが繰り広げられて、大変な混乱が続いています。人々は街頭で民主主義を求めて抗議活動を行っています。香港と香港の人々への支援をお願いいたします。そして可能でしたら香港を訪れてください。

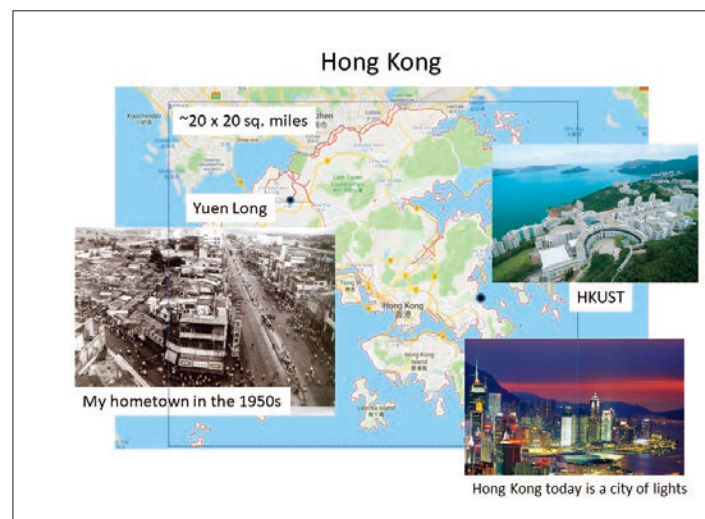


Fig. 1

私は香港の北西部、元朗区で育ちました。1950年代、元朗区は小さいけれど賑やかな町で、隣接する村々の中心地としての役割を担っていました。ここに見られるように、大通りには店やレストランが並んでいました。村の人々はよく軽食を食べにきたり、農産物を売りにきたりしていました。私は20歳で香港を出るまで、家族とともに近隣の村の一つに住んでいました。5年前、香港科技大学に着任し香港に戻ってきました。

村にあった私の家族の家は、1921年に祖父が建てたものです(Fig. 2)。写真のよ

Evolution of OLED Display Technology

Ching W. Tang

I would like to thank the Inamori Foundation for giving me such a high honor. Today, I'm going to talk about the Evolution of OLED Display Technology. OLED stands for Organic Light-Emitting Diodes. In many ways, what I am going to tell you is a journey of my life.

I was born in Hong Kong (Fig. 1). Hong Kong is a small place, measuring about 20 miles × 20 miles. It is a bustling and beautiful city—a city of lights, beautiful lights decorating its harbor at night. Unfortunately, Hong Kong in the last couple of months has been very chaotic with sometimes violent protests on the streets. People are on the streets to demonstrate for democracy. I would like to ask for your support for Hong Kong and its people, and to come to visit if you can.

I grew up in the northwest part of Hong Kong, in a place called Yuen Long. In the '50s, Yuen Long was a small but busy town, serving the neighboring villages. The main street, as you see here, was lined with shops and restaurants. The villagers would come to enjoy the morning tea or sell their produce. I lived with my family in one of the nearby villages until I left Hong Kong when I was 20 years old. I returned to Hong Kong 5 years ago to work at the Hong Kong University of Science and Technology (HKUST).



Fig. 2

Our family house in the village was built by my grandfather in 1921 (Fig. 2). It's still standing today as you can see in the photo. It is still here after almost 100 years because it was built with very good bricks. The bricks were made in a kiln owned by my grandfather, I was told. I guess he probably used the best bricks from the kiln to build

うに、今でも建っています。100年近く経過してもまだ建っているのは、非常に良い煉瓦で建てられているからです。この煉瓦は祖父が所有していた窯で作られたと聞いています。おそらく祖父は家族に最高の家を作るため、窯でできた最高の煉瓦を使ったのでしょう。家の近くには村の廟があります。一部屋の建物に小さな部屋が付いています。この小さな部屋は一部屋の校舎でした。私は5歳の時ここで初めて教育を受けました。ほんの数カ月、非常に簡単な中国の詩を学んだ後、もっと正式な学校に移りました。

私は1953年から1959年まで、小学校で初期教育を受けました。その学校は1951年に建てられたもので、私の父は学校建設に関わった教育委員会の創設メンバーでした。父は地域の重要人物で、商取引や教育の問題に少なからぬ影響力を持っていたようです。また広い人脈も持っていました。1953年、学校を視察したアメリカ副大統領のリチャード・ニクソンと父と一緒に写った写真が残っています。当時、父にどのような力があって、アメリカ副大統領に香港のはずれにある父が建てた小学校に来てもらったのかは、私にはわかりません。写真では父は指示でも出しているかのように、リチャード・ニクソンを指さしています。私の家族はアメリカ大統領と非常に特別なつながりを持っていると言わざるを得ません。父が後にアメリカ大統領となるニクソンに会っただけでなく、私の息子もオバマ大統領と会っており、一緒に写真を撮っています。これは2011年のことで、オバマ氏が再選を目指して出馬していた頃です。私にはよくわかりませんが、おそらく息子はオバマ氏の再選に何かしら関わったのでしょう。父も息子もアメリカ大統領に会う機会があったのですが、残念ながら私はまだアメリカ大統領に会ったことはありません。

1967年に私は香港を出て、カナダのバンクーバーにあるブリティッシュコロンビア大学に入学しました。私は化学を学び、オグリズロ教授と研究をする機会を得ました。なぜ研究に関心を持ったのかわかりませんが、私は物を作るのが好きでした。オグリズロ教授の研究室で夏の数カ月間、自分の実験用にガラス多岐管を作るようになりました。私は独力でガラスを吹いて製作し、それを非常に誇りに思っていました。ガラス吹き工として生計が立てられるのではないかと思うほどでした。しかし、そうしなくてよかったと思っています。ブリティッシュコロンビア大学で3年学んだ後、コーネル大学に移って、A・C・アルブレクト教授のもとで博士号取得に向けて研究をしました。

アルブレクト教授からは多くのことを学びました。教授は分子分光学が専門で、主

the best house for his family. Nearby our family house is the village shrine. It's a one-room building with a small room attached to it. The small room was a one-room schoolhouse where I had my first taste of education, when I was 5-year old. I spent only a few months there learning very simple Chinese verses before moving on to a more formal school.

My early education took place in a primary school from 1953 to 1959. The school was built in 1951, and my father was a founding member of the school board responsible for building the school. He was an important person in the community with considerable influence in commerce and education matters. He had good connections with many people. And as you can see here in this 1953 photo*, he was with Richard Nixon, the Vice President of the United States, who was at the school for a visit. I don't know what influence he had at the time that he could make a Vice President of the United States pay a visit to his primary school in a remote place in Hong Kong. You see in the photo* he was pointing at Richard Nixon as if he was telling him what to do. I have to say that my family has very special connections with the Presidents of the United States. Not only my father had a chance to meet with Nixon, who later become the President of the United States, here in this photo* is my son meeting with President Obama. That was in 2011 when Obama was running for re-election. Maybe my son has something to do with his being reelected, but I'm not so sure. So, both my father and my son had their chances to meet with the President of the United States, but I am afraid I have yet to meet a US President.

I left Hong Kong in 1967 for the University of British Columbia in Vancouver, Canada. I studied Chemistry and I had the opportunity to do research with Professor Ogryzlo. I don't know how I got interested in research, but I know I like to build things. Working in Ogryzlo's lab in the summer months, I learned to build a piece of a glass manifold for my experiments. I did the glass blowing all by myself and I was very proud of it. I even thought that I could make a living as a glass blower, but I'm glad I didn't. After three years at UBC, I moved on to Cornell University to do my PhD under Professor A. C. Albrecht.

I learned many things from Albrecht. He's a molecular spectroscopist, a theorist mostly. So, I learned some molecular spectroscopy, some solid state physics under his directions. He seldom directed me or any of his students to do experiments. He was just there to guide us, for us to ask questions, and to reason with us. He trained us to be independent researchers, and also taught us his mode of liberalism and humanity. He introduced me to New York Times—the newspaper I still read every day.

*The images are omitted due to copyright protection.

に理論を研究していました。そのため、私は教授の指導のもとで、分子分光学と固体物理学を学びました。彼はめったに私や他の学生に実験をするよう指示しませんでした。彼はただそこにいて、私たちを導き、私たちのために質問を投げかけ、理論を説明してくれました。彼は自立した研究者になるよう私たちを鍛えるとともに、彼の考える自由主義や人間らしさについて教えてくれました。教授は私にニューヨークタイムズ紙を勧めてくれました。この新聞を私は今でも毎日読んでいます。

博士号取得後すぐ、1975年からイーストマン・コダック社で働き始めました。31年勤務しました。同社の研究室で働くのはとても楽しかったとしか言いようがありません。コダック社を退職した後、幸いにも大学で新しいキャリアを始める機会を得られました(Fig. 3)。2006年にロチェスター大学化学工学科に迎えられたのです。2014年には香港に戻り、香港科技大学高等研究院で現在の職に就きました。ここまで簡単にお話ししたのは、私個人の進化です。

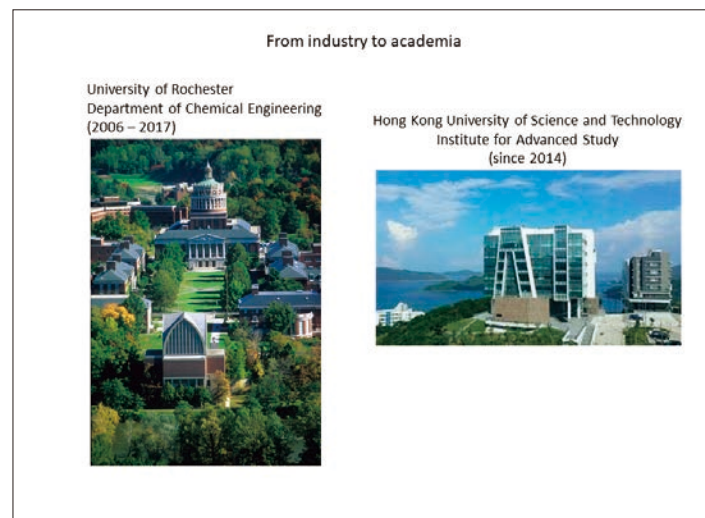


Fig. 3

ここからは、「ディスプレイ技術の進化」についてお話ししましょう。この図では横軸が1950年から2030年を示し、未来へと伸びています。縦軸はディスプレイの対角寸法で、単位はインチです(Fig. 4)。小さいディスプレイは1インチ未満ですし、大きいものは100インチを超えています。1950年代、みなが持っていたのはブラウン管でした。ブラウン管は1990年代まで50年ほど使われました。その頃にはもっと大きな画面のテレビが望まれるようになっていましたが、40インチを超える画面のブラ

I went to work for Eastman Kodak in 1975 right after graduate school. I spent 31 years there and I must say I enjoyed working there in the research lab very much. After Kodak, I was fortunate to have the opportunity to begin a new career in the academia (Fig. 3). I joined the Department of Chemical Engineering in the University of Rochester in 2006. In 2014, I came back to Hong Kong to take up my current position at the Institute for Advanced Studies of the Hong Kong University of Science and Technology (HKUST). That was my personal evolution in a snapshot.

Now, I'll tell you the “Evolution of Display Technologies.” In this diagram, the horizontal axis indicates the year from 1950 to 2030, projecting into the future, and the vertical axis is the diagonal dimension of the display in inches (Fig. 4). Small displays can be as small as less than 1 inch and large displays can be over a hundred inches. In 1950s, all we had were CRTs—cathode ray tubes. CRTs lasted 50 or so years till 1990s. By then people demanded TVs with a bigger screen, but it was practically impossible to build CRT-TVs with a screen bigger than 40 inches. The TV set would get so big and heavy that it would be difficult to get it through the door into a house or apartment.

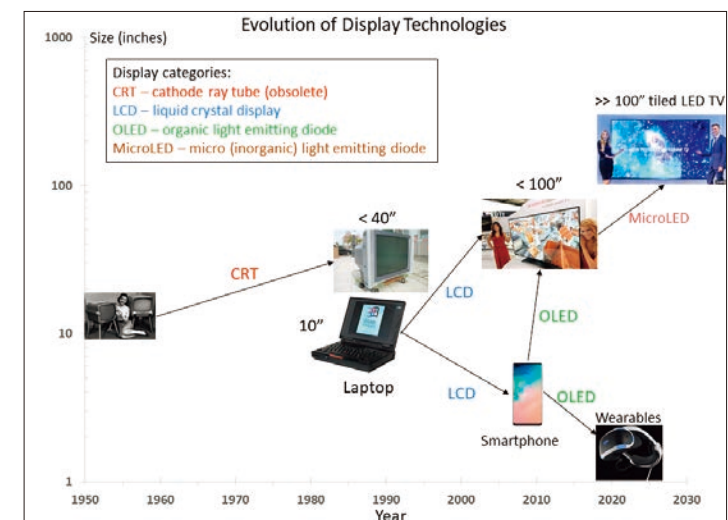


Fig. 4

CRTs came to the end of their useful life by 1990s. More importantly, there was an evolution in computing with demand for portable computers, or laptops. The display industry had to come up with a new display technology that is light-weight and therefore portable. In came flat-panel displays and CRT became obsolete. There were different kinds of flat-panel display technologies competing for dominance in the marketplace.

ウン管テレビを作るのは、実質的に不可能でした。そのような大きさの画面であれば、テレビ本体が非常に大きく重くなるため、家やアパートのドアを通すことが難しくなるでしょう。

便利だったブラウン管の利用は1990年代に終わりを迎えました。さらに重要なこととして、持ち運びができるコンピュータ、つまりノートパソコンの需要が高まり、コンピュータに進化が訪れました。ディスプレイ業界は軽くて持ち運びができる新しいディスプレイ技術を開発しなければなりませんでした。フラットパネルディスプレイが登場し、ブラウン管は時代遅れになりました。市場には優勢を争ういくつかのディスプレイ技術がありました。LCD——液晶ディスプレイ——が台頭して勝者となりました。LCDは小さな製品も大きな製品も生産でき、コストも低かったことが主な理由です。携帯電話、ノートパソコン、モニター、大画面テレビに幅広く使われ、今でも使われています。

OLEDは2010年頃から市場に登場しました。LCDの約20年後です。OLEDもLCD同様、小さなディスプレイにも大きなディスプレイにも利用することができますが、OLEDには独自の特徴があります。それは折り曲げたり丸めたりできることです。簡単に曲げられ、湾曲した画面を作ることができます。このような形状の自由度が高いという性質から新しい利用法が可能です。人々が身につけることのできる、時計や他のディスプレイなどです。

つい最近、ほんの1年か2年前のことですが、新たなディスプレイ技術が現れました。マイクロLEDと呼ばれるものです。これは無機物質である窒化ガリウムLEDを基にしています。マイクロLEDを用いると、個々のディスプレイユニットを継ぎ目なしにタイルのように並べて、超大型のディスプレイ画面を作ることが可能です。実のところ、お金をかければいくらでも大きくできます。上部のすみに示してありますが、サイズ面ではほぼ限界がありません。しかしながら、少なくとも今のところ小さくはできません。

これまでのところOLEDとLCDが競合しています。しばらくの間、両者ともにマイクロLEDを警戒する必要はないでしょう。今となってはブラウン管は時代遅れになっていますが、とても重要なディスプレイ技術ですので、どのようにして発見されたのか簡単にお話ししたいと思います。

まず、1895年にJ・J・トムソンによって電子が発見されました。彼はその功績により、1906年にノーベル賞を受賞しました(Fig. 5)。数年後、カール・ブラウンは蛍

LCDs—liquid crystal displays have emerged as the winner, mostly because LCDs can be made both small and large, and at a low cost. They were widely used in cellphones, laptops and monitors, and large-screen TVs, and still are.

OLED came into the display market around 2010, and that's about 20 years after LCD. OLED can be used for both small and large displays, just like LCDs. OLED has a unique feature, which is that it can be folded and rolled. It can be easily bended to form a curved screen. These form factors allow new applications like watches and other displays that you can wear on the body.

More recently—just in the last year or two, another new display technology came along. It is called micro-LED. It is based on inorganic gallium nitride LED. With micro-LED, individual display units can be tiled together, without seams, to form an ultra-large display screen. In fact, it can be made as large as one can afford to pay for it. This display technology, shown here at the upper corner, almost has no limit in size. However, they cannot go small, at least not now.

So far, OLED and LCD compete well against each other, and they don't have to worry about the micro-LED for a while. Because CRT is such an important display technology, even though it is obsolete, I want to briefly mention how that discovery came about.

First of all, there was the discovery of the electron by J. J. Thomson back in 1895, and he was given a Nobel Prize in 1906 because of that (Fig. 5). A few years later Karl

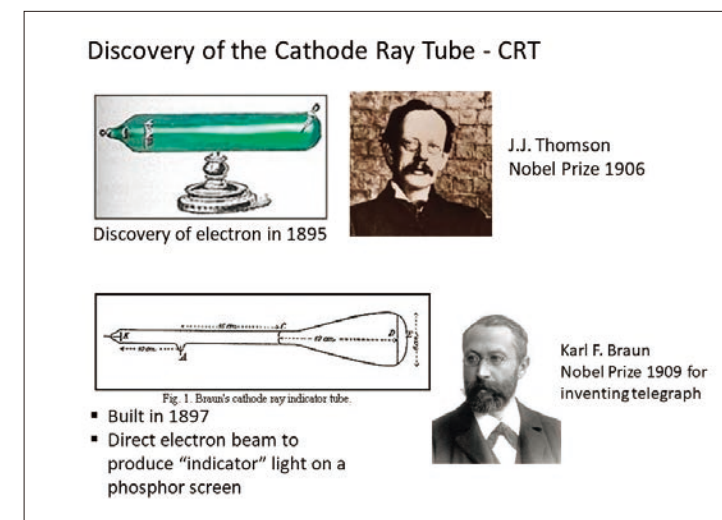


Fig. 5

光体を塗ったスクリーンに電子を照射して、画像を表示させることに成功しました。このようにしてブラウン管テレビ、つまり近代のテレビが初めて発見されました。ブラウンは1909年にノーベル賞を受賞しましたが、受賞理由はブラウン管の発見ではなく、無線通信の発明でした。ですから、聡明であれば、多くのことができますし、そのうちの何かでノーベル賞を受賞することも可能でしょう。

ブラウン管の問題は(Fig. 6)、ガラスでできた真空管の中で電子ビームを射出するという技術に基づいているため、非常に重くて奥行きが長いことです。ブラウン管の場合、スクリーン上のすべての画素——私たちはピクセルと呼びますが——に対して1つのアドレッシングエレメント(電子銃)があります。スクリーン上には数百万ピクセルある場合もありますが、電子銃は1つだけです。そこで磁界または電界を利用して、電子をスクリーンに向かわせます。ブラウン管では、奥行きはスクリーンの大きさに比例し、重さも同様です。そのため、とても大きな画面のブラウン管テレビを作るのは非常に難しいのです。

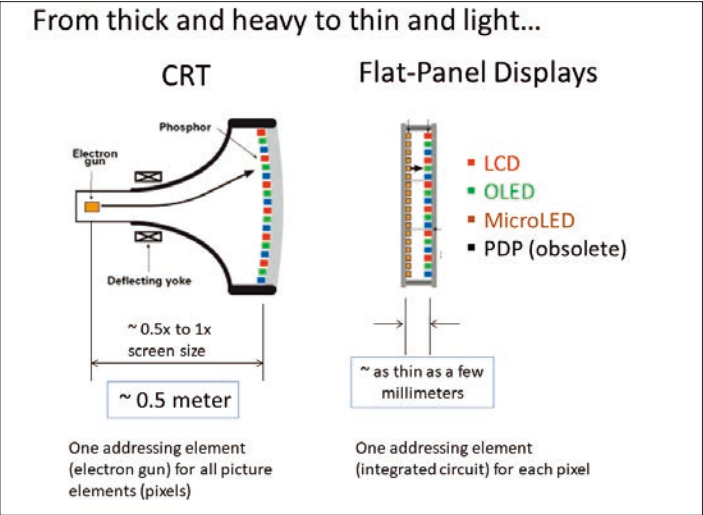


Fig. 6

フラットパネルディスプレイの技術がブラウン管に取って代わりました。重要な違いは、フラットパネルディスプレイではすべてのピクセルにアドレッシングエレメントがあることです。この方法では、図の右に示すようにアドレッシングエレメントとピクセルの両方をフラットスクリーン内にコンパクトに詰めることができます。フラットパネルディスプレイはたった数ミリという薄さにすることが可能です。実際、

Braun used electrons to hit a screen that has a phosphor on it so that an image can be produced on the screen. That is how the CRT tube or the modern TV was first discovered. Braun won a Nobel Prize in 1909, not for discovering the CRT but for inventing the telegraph. So, if you're smart, you can do many things and win a Noble Prize for any one of them.

The problem with CRT (Fig. 6) is that it's very heavy and very thick because the technology was based on directing an electron beam in a vacuum glass chamber. In CRT, there is one addressing element for all the picture elements, we call pixels, on the screen. There can be millions of pixels on the screen, but only one electron gun. So, the gun has to be directed to the screen using a magnetic field or electric field. In CRT, the thickness is proportional to the screen size, and so is the weight. Therefore it is very difficult to produce CRT with a very large screen.

Flat-panel display technologies came to replace CRT. The key difference is that there is one addressing element for every pixel in a flat-panel display. In this way, both the addressing elements and the pixels can be compacted together into a flat screen as shown in this diagram on the right here. The thickness of a flat-panel display can be only a few millimeters. In fact, for OLED it can be less than 1 millimeter, the thickness of a single piece of glass or plastic. That's why OLED display can be rolled up. In a sense, flat-panel display is literally a revolution in display technology rather than evolution from CRT, going from the big and heavy to thin and light.

LCD has been the dominant technology in flat-panel displays for decades. It was first discovered in RCA Laboratories in the 1960s by Williams (Fig. 7). He observed that

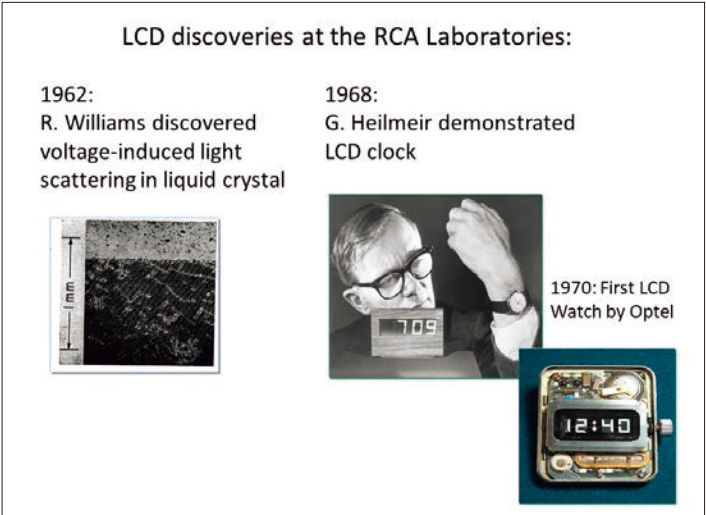


Fig. 7

OLEDでは1ミリ未満にすることができます。1枚のガラスやプラスチックの厚さです。そのため、OLEDディスプレイは丸めることができます。ある意味、フラットパネルディスプレイはブラウン管からの進化というよりは、ディスプレイ技術の革命でしょう。重くて分厚いから薄くて軽いへの革命です。

フラットパネルディスプレイの中でLCDは数十年間、技術として優勢を誇ってきました。LCDは1960年代にRCA社の研究室でウィリアムズによって初めて発見されました(Fig. 7)。彼は2つの基板に挟まれたネマチック液晶に電圧をかけると、液晶が曇ることを発見しました。電圧をかけるのをやめると透明になりました。液晶はそれを通った光を透過させたり遮ったりするシャッターとして使えることがわかりました。数年後には同じくRCA社のジョージ・ハイルマイヤーがその発明を利用して、液晶で時計を作りました。これが初めてのLCDディスプレイの使用例です。この液晶ディスプレイの先駆的な功績のため、彼は2005年に京都賞を受賞しています。

この時系列図に示されているように、LCDの進化には50年かかりました。1960年代のウィリアムズとハイルマイヤーの発見から始まり、続いて1970年代にはシャットとヘルフリッヒによるねじれネマチック液晶などの重要な発見があり、さらにアモルファスシリコンを用いたアクティブマトリックスバックプレーンが開発されました。参考までに述べておきますが、1970年代の終わりがOLEDの始まりであり、LCDに15年以上の後れを取っていました。LCDのディスプレイ技術に役立つ重要な

when a voltage was applied to nematic LCD liquid sandwiched between two plates, the LCD liquid turned cloudy. Removing the voltage, it turned transparent. So LCD can be used as a light shutter to pass or block light through it. A few years later, George Heilmeyer, also from RCA, took the invention and made a clock out of it. That was the first application of LCD display. For his pioneering LCD work, Heilmeyer was given the 2005 Kyoto Prize.

The evolution of LCD took 50 years, as you can see in this timeline chart. It started with the Williams and Heilmeyer discovery in the '60s, followed by other important discoveries such as the twisted nematic LCD by Schadt and Helfrich in the 1970s and the development of active matrix backplane using amorphous silicon. For reference the end of '70s marked the beginning of OLED, so OLED was behind LCD by more than 15 years. There are other major technical developments that helped LCD display technology. One was the development of the blue LED by Nakamura, Akasaki and Amano. They won the Nobel Prize a couple years ago for inventing blue LED. With blue LED came white LED for backlighting LCD, which made LCD display more efficient and compact. There were other major advances in LCD display technologies that resulted in significant improvement in performance. In the display market, 2010 marked the entry of LCD display manufacturers in China, with steep price drop in LCD over the past decade as a result. Today, you can buy a 65" LCD-TV for about \$500 in the United States. It's very inexpensive for such a large TV. Roughly this is the timeline for LCD.

Now I come to the “Evolution of OLED.” Mainly, OLED is here to challenge LCD. LCD is a good display technology, but it also has major drawbacks. Otherwise it would not be possible to overtake LCD.

So, what's the major difference between LCD and OLED displays? This is a schematic picture of LCD (Fig. 8). It has a stack arrangement with multiple layers. The key LC layer is in the middle. By turning the voltage on or off, light can pass through this layer or be blocked. LCD display needs a backlight to work. There are other layers in the stack, including a pair of polarizers which allow the LC to act as a shutter.

A major drawback in LCD is that the backlight needs to be always on. It wastes power, and this is the case for most LCD displays. The newer generation of LCD displays use local dimming to save power and improve contrast, meaning that the backlight (distributed over the panel area) can be on and off depending on the local demand. In any case, it complicates the LCD display and increases cost. The biggest problem with LCD is light leakage. It's not a 100% perfect light shutter. The little amount

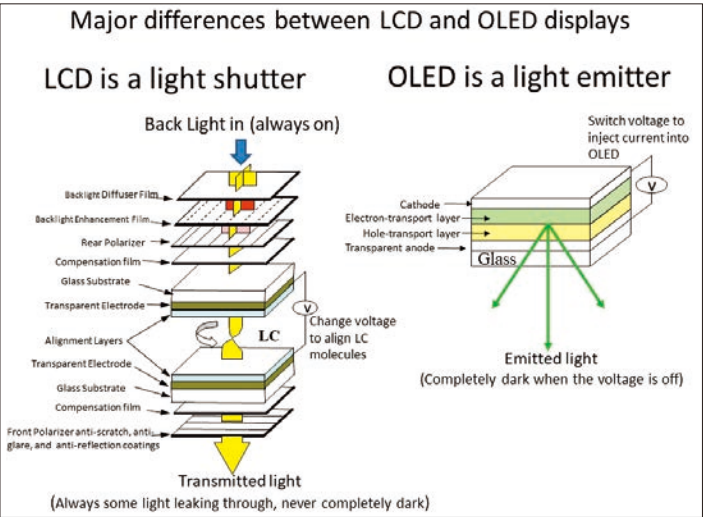


Fig. 8

技術的發展もいくつかありました。1つは中村、赤崎、天野の3氏による青色LEDの開発です。彼らは数年前、青色LEDの発明によりノーベル賞を受賞しています。青色LEDの発明によって白色LEDができ、これがLCDのバックライトに用いられたことで、LCDはより効率的でコンパクトになりました。LCDのディスプレイ技術にも大きな前進があり、性能が大幅に改善されました。ディスプレイ市場では、2010年に中国のメーカーが参入し、その結果、この10年で価格が大きく低下しました。今日、アメリカでは約500ドルで65インチのLCDテレビを買うことができます。このように大きなテレビが非常に安価で買えるのです。大まかにですが、LCDについて時系列でお話ししました。

それでは、「OLEDの進化」についてお話ししましょう。OLEDはもっぱらLCDに挑む立場にあります。LCDは素晴らしいディスプレイ技術ですが、大きな欠点があります。そうでなければLCDに勝つことは不可能でしょう。

では、LCDとOLEDディスプレイの大きな違いは何でしょうか。これはLCDの概略図です(Fig. 8)。積層構造で何層かになっています。重要な液晶の層は中ほどにあります。電圧をオンまたはオフにすることで、光がこの層を透過したり遮断されたりします。LCDにはバックライトが必要です。積層構造の中には2枚の偏光板も含まれており、これによって液晶はシャッターの働きをすることができます。

LCDの大きな欠点は、バックライトを常にオンにしておかなければならないことです。電力の無駄遣いで、ほとんどのLCDがそうになっています。新しい世代のLCDはローカルディミングを用いて電力を節約し、コントラストも改善されています。つまりバックライト(パネル全体に配置されている)が、必要に応じて局所的にオン・オフできるということです。いずれにしても、LCDを複雑化させて、コストを押し上げています。LCDの最大の問題は光が漏れることです。光を100%遮ることができません。少量の光が漏れてコントラストと画質が悪くなります。言い換えると、LCDでは完全な黒を出せないのです。

OLEDは発光体です。原理的に、OLEDには1つの支持基板上に2つの層と2つの電極が必要になります。電圧がオンになると電流が素子に流れ、光を生み出します。電圧がオフになると光もオフになります。コントラスト比、つまりネイティブコントラスト比は暗い視聴環境では無限大です。LCDのコントラストはずっと低く、コントラスト比は良くても数千です。これがOLEDとLCDの大きな違いです。差は歴然ですので、見れば2つのディスプレイの質の違いがわかると思います。

of light that leaks through can significantly degrade the contrast and the image quality of the display. In other words, LCD cannot achieve a perfect black.

OLED is a light emitter. Conceptually OLED requires two layers plus two electrodes on a support substrate. When the voltage is turned on, current passes through the device to produce light. When the voltage is turned off, the light is off. The contrast ratio, or the native contrast ratio, can be infinite, in a dark viewing environment. The contrast in LCD is much lower, at best the contrast ratio is a few thousands. This is a major difference between OLED and LCD displays, enough that your eye can tell the quality difference between the two displays.

OLED stands for Organic Light-Emitting Diode. Where is “organic” coming from? Traditional, or conventional, light emitting diode is based on inorganic semiconductors, as shown in this picture (Fig. 9). Basically, it is a point light source coming from a very tiny chip, about tens of micron on the square. Applications include lighting, backlight for LCD, and billboards. OLED is an area light source instead of a point source. It is based on amorphous organic thin films. OLED is used in smartphones, televisions and wearables such as watches. The real difference between inorganic LED and organic LED is that organic LED can be processed in large area, so it is suited for making TVs and other flat-panel displays. The fact that it is a light emitter and can be turned on and off very quickly is also a very important feature for display applications.

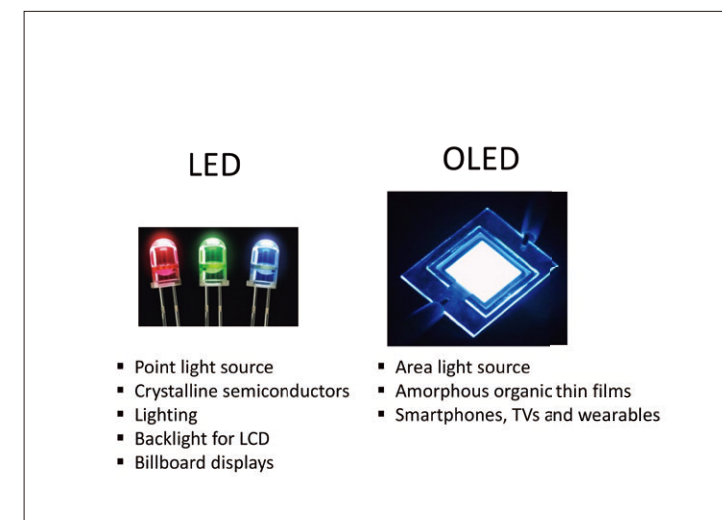


Fig. 9

OLED (Organic Light-Emitting Diode)は有機発光ダイオードを意味します。どこから「有機」が来たのでしょうか？ 伝統的な、つまり従来の発光ダイオードは、Fig. 9に示すように無機半導体を基にしています。簡単に言うと、極小のチップから発光する点光源です。約数十平方ミクロンの大きさです。照明やLCDのバックライト、広告板などに使われています。OLEDは点光源ではなく面光源です。非晶質有機薄膜を基にしています。OLEDはスマートフォンやテレビ、腕時計などウェアラブル製品に使われています。無機LEDと有機LEDの違いは、有機LEDの場合、大面積加工できることです。ですから、テレビや他のフラットパネルディスプレイの製造に向いています。発光体であり、素早くオン・オフできることは、ディスプレイへの応用に非常に重要な特性です。

今日では幅広いOLEDディスプレイ製品があります。LG社製88インチの8Kテレビを買うことはできますが、高価です。OLEDディスプレイのノートパソコンやタブレットもあります。最も重要な利用例は携帯電話です。腕時計やAR(拡張現実)、VR(仮想現実)にも利用されています。

OLEDはディスプレイとして非常に幅広い用途があり、それがLCDと同じように成功している理由です。もしOLEDが大型ディスプレイの分野で、または小型ディスプレイの分野でしか利用できないなら、有用性は低くなるでしょう。さらにOLEDは素晴らしい画質を持っています。

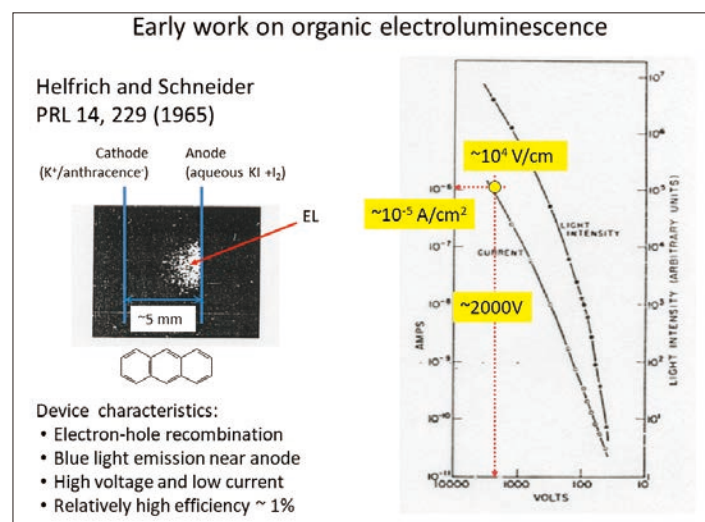


Fig. 10

Today's OLED display products are wide ranging. You can buy an 88-inch/8K television from LG, but the price is high. There are laptops and tablets with OLED displays. The most important application for OLED is in cellphones. You also have application in watches, AR and VR.

OLED covers a very broad range of display applications and that is the reason it is so successful, like LCD. If OLED can be used in only large-area displays or only in small-area displays, it will not be so useful. On top of all, OLED has excellent display quality.

In 2013, OLED-TV was first introduced by LG. This* was me in front of an OLED-TV in a store in Hong Kong. The price at that time was more than 10,000 US dollars. Today, at least in the US market, you can get one for about \$1000. It is a factor of 10 reduction in price over 6 years, which is quite remarkable. We can look forward to further price reduction in the OLED display products in the future.

I want to show you what is in the future for OLED displays. This video is from a LG commercial about their future OLED TVs. You can see the OLED display coming out from a box. This looks particularly good if you have a beautiful window in your bedroom or living room. You can place the box in front of the window. You can look outside of the window if you don't want to watch TV or raise the OLED screen from the box if you want to watch. You can have this kind of TVs because OLED is so thin that it can be rolled up like a sheet of paper. OLED, because of its thinness, can also be folded. Foldable phones are in the market now; they are sold by Samsung and Huawei, and maybe a few others. Rollable TVs and foldable phones are available products today, but they are kind of expensive.

Now I would like to go back in time to tell you the "Discovery of OLED." OLED is based on electroluminescence (Fig. 10). An early work published by Helfrich and Schneider was done back in the '60s. In this paper the device was made of anthracene crystal which was sandwiched between two electrodes. When a voltage on the order of 2000 volt was applied on the device, a very small current, on the order 10 microamperes per square centimeter, would pass through it. Light was produced due to the recombination of the electrons from the cathode with the positive charges from the anode. The color was blue, so the first blue LED was an organic LED, not an inorganic LED. This early OLED device required high voltage and produced low current, so even though the efficiency was high, there were no practical applications.

Here is how I came across OLED (Fig. 11). I joined Kodak in 1975 and spent my first few years there working on organic solar cells. It was a total failure in terms of

*The images are omitted due to copyright protection.

2013年、OLEDテレビが初めてLG社によって製品化されました。私は香港の店でOLEDテレビが販売されているのを見ました。当時の価格は約1万ドル以上でした。今では少なくともアメリカ市場では、約1,000ドルで購入できます。6年の間に値段が10分の1になりました。非常に驚くべきことです。将来OLEDを利用したディスプレイ製品が、さらに値下がりすることが期待できます。

OLEDディスプレイの将来がどのようなになるか、お見せしたいと思います。このビデオの出典はLG社のコマーシャルで、同社の今後のOLED テレビについてのものです。OLED ディスプレイがボックスから出てくるのが見えると思います。もし寝室やリビングルームに立派な窓があれば最高です。ボックスを窓の前に設置すればいいのです。テレビを見たくなければ、窓の外を見ることができます。テレビを見なくなったら、ボックスからOLEDスクリーンを引き出せばいいのです。このようなタイプのテレビが可能になるのは、OLEDが非常に薄く、紙のように丸めることができるからです。OLEDはその薄さのため、折りたたむことも可能です。折りたためる携帯電話が、現在、市場に出ています。サムスン社とファーウェイ社から発売されています。おそらくほかにも販売しているところがあると思います。丸められるテレビと折りたためる携帯電話は、入手可能な製品ですが、かなり高価です。

少し時間をさかのぼって、「OLEDの発明」についてお話ししたいと思います。OLEDの基本はエレクトロルミネセンス(EL)です(Fig. 10)。初期の研究はヘルフリッヒとシュナイダーにより発表されたもので、1960年代に行われました。この論文では素子は2つの電極に挟まれたアントラセンの結晶で作られていました。2,000ボルトほどの電圧がかけられると、1平方センチメートル当たり10マイクロアンペアほどの非常に小さい電流が流れました。光は陰極からの電子と陽極からの正電荷の再結合によって生み出されました。色は青色でした。ですから最初の青色LEDは無機LEDではなく有機LEDだったのです。この初期のOLEDデバイスには高電圧が必要で、作られるのは低電流でした。効率は良かったのですが、実用的な用途はありませんでした。

OLEDに出会うまでのいきさつをお話しします(Fig. 11)。1975年にコダック社に入社し、最初の数年は有機太陽電池の研究をしていました。有用なものが1つも作れず、応用という点では全くの失敗でした。しかし、かなり重要な発見がありました。それは2層デバイス構造、つまりpnヘテロ接合構造のことで、光生成効率、すなわち太陽電池の効率を高めることができました。

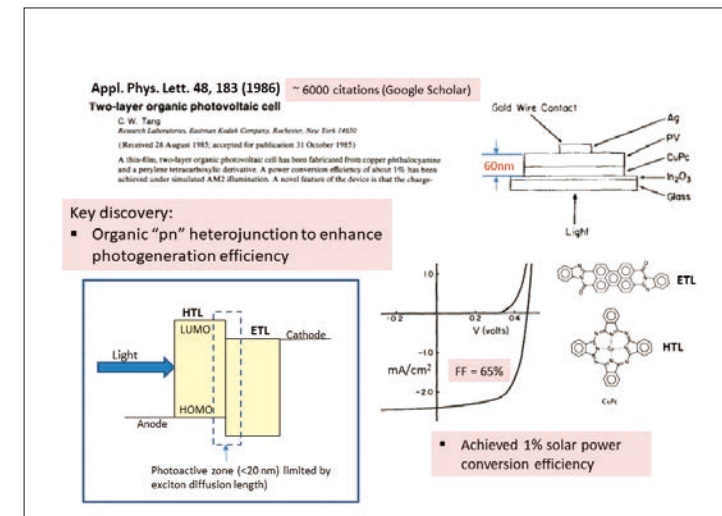


Fig. 11

application as I did not make anything useful. But I did discover something quite important and that was a two-layer device structure, or the pn-heterojunction structure, to enhance the photogeneration efficiencies, in other words, the solar cell efficiencies.

The heterojunction structure is shown in this energy level diagram. When light is absorbed in this region, it creates excitons which can be dissociated by the heterojunction to produce holes and electrons. They then drift to the electrodes and are collected in an external circuit.

It was quite an accomplishment at the time as I was able to achieve 1% efficiency in an organic solar cell with proper choice of organic materials and optimized layer thicknesses. But the only problem was that the power conversion efficiency was low. I got 1% efficiency comparing to 10% or 20% efficiency in inorganic solar cells at that time. The reason organic solar cells I made then were so inefficient is that the organic absorbing layers were too thin. They don't absorb enough light to produce enough current for solar cell applications. Unfortunately I cannot increase the layer thickness, because the transport of charges would become a limitation. So, I failed to produce useful organic solar cells and I moved on.

I moved on to organic light emitting diodes (Fig. 12). I used the same heterojunction structure for building OLED, and used almost identical layer thicknesses, and of course different materials. With OLED I need to inject charges into the device. The electron is from the cathode and the hole, or positive charge, from the

ヘテロ接合構造がエネルギーレベル図に示してあります。この領域で光が吸収されると、励起子が生成され、ヘテロ接合部で正孔と電子に分離します。これらはその後、電極に向かい外部回路に流れます。

有機材料を適切に選択し、層の厚さを最適化したことにより、有機太陽電池で1%の効率を達成できたのは、当時としては素晴らしい成果でした。しかし、唯一問題だったのは電力変換効率が低いことでした。私が達成した変換効率は1%でしたが、当時、無機太陽電池では10~20%の効率が得られていたのです。私が製作した有機太陽電池の効率が非常に悪かったのは、光を吸収するための有機物の層が薄すぎたからです。太陽電池として利用するために、充分必要な電流を起こすだけの充分な光を吸収しないのです。電荷の輸送がうまくいかず、残念ながら層を厚くすることができませんでした。実用化できるような有機太陽電池を作ることができず、私は別の研究に移りました。

有機発光ダイオードの研究に移りました(Fig. 12)。私は同じようにヘテロ接合構造を用いてOLEDを製作しました。ほぼ同じ膜厚の層を使いましたが、もちろん材料は別のものです。OLEDでは電荷をデバイスに注入しなければなりません。電子は陰極から、正孔(正電荷)は陽極からです。電子と正孔の再結合はヘテロ接合部で起こります。ヘテロ接合部にはエネルギー障壁があって、電荷が通り抜けられないからです。電子と正孔は再結合するしかなく、再結合領域は非常に薄くなります。実は薄

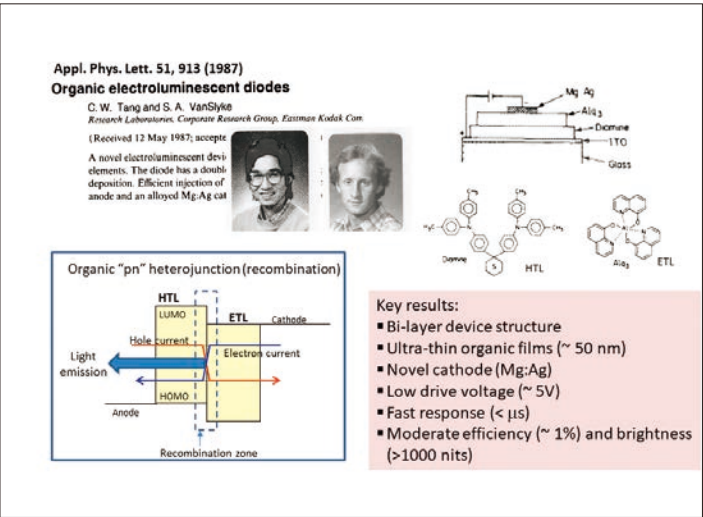


Fig. 12

anode. The recombination of electron and hole takes place at the heterojunction because there are energy barriers at the heterojunction to prevent the charges to cross over. The electrons and holes have to recombine, and the recombination region can be very thin. Using thin layers actually helps, because it lowers the drive voltage. So, with the heterojunction structure, and with a proper choice of organic materials, which is very important, I made OLED and got fairly high efficiencies. I also engineered a new cathode, a magnesium-silver alloy, for electron injection. It helps lower the voltage and increase the OLED efficiency. Another nice feature is that the response time is very fast. With all these features as described in this 1987 paper, this bi-layer OLED device was recognized to be almost perfect for display applications. This paper was cited over 16,000 times.

A little more statistics about this paper. Since its publication in 1987, the number of citations has gone up year after year for almost two decades. The country that cited this paper most is China now, probably because they have more researchers on this field (Fig. 13), followed by Japan, South Korea and the United States. This reflects the

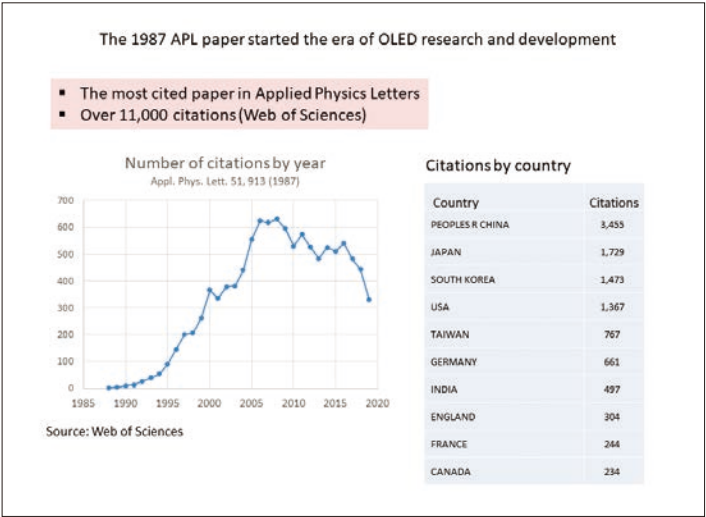


Fig. 13

development of OLED technology mainly in the Asia region.

About 2 years after the publication of the bi-layer OLED paper, I came up with a scheme to produce various colors (Fig. 14). What we did was to insert a third layer in the bi-layer structure, we called it the doped layer. This doped layer has a mixed composition with fluorescent molecules as the dopant embedded in a host matrix.

膜を使うことは素子の電圧を下げるうえで有効です。このように、ヘテロ接合構造を用いて適切な有機材用を選んで——これがとても重要なのですが——私はOLEDを製作し、非常に高い効率を実現しました。私は新しい陰極も製作しました。マグネシウム(Mg)と銀(Ag)の合金で、電子を注入するためのものです。この電極のおかげで電圧を下げ、OLEDの効率を高めることができました。(OLEDには)別の素晴らしい特性として、応答時間が非常に速い点があります。これらのすべての特徴については1987年の論文で説明しており、この二層OLEDデバイスはディスプレイへの利用にほぼ理想的であると認識されました。この論文は1万6000回以上引用されています。

この論文の統計的データについてもう少しお話ししましょう。1987年に発行されてから、約20年の間、被引用数は年々増加しています。現在、最も引用している国は中国です。おそらくこの分野に他国よりも多くの研究者がいるのでしょう(Fig. 13)。これに日本、韓国、アメリカが続きます。OLED技術が主にアジア地域で発展していることを反映しています。

二層OLEDの論文が発行されてから約2年後、様々な色を生み出す手法を考え付きました(Fig. 14)。私たちが行ったのは、二層構造にドーパ層と呼ぶ三層目を挿入することでした。このドーパ層はドーパントとして蛍光分子がホスト材料に埋め込まれた混合組成となっています。

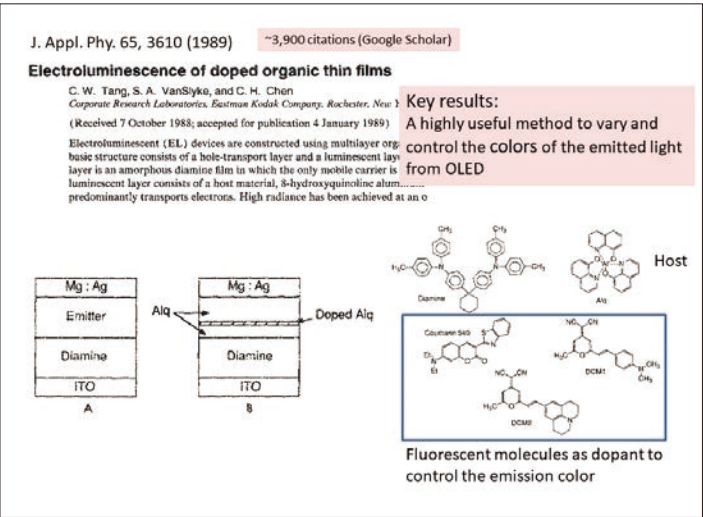


Fig. 14

The dopant fluorescent molecules act as the emitter in this scheme and therefore can be selected to produce various colors from an OLED device. With this scheme, we were able to produce green light or red light with higher efficiencies and even longer life time. We were not able to produce blue light at the time because the Alq host we used can only generate green light. This doping principle is useful for producing all RGB colors with a blue host—one that can generate blue light.

My major contribution to the OLED field was the bilayer heterojunction structure, which ensures that the electron-hole recombination in an OLED device is practically 100%. These recombination events produce excitons and they decay through two different channels (Fig. 15). One is through the singlet channel, and the other through the triplet channel. All my early work on OLED was based on fluorescent materials meaning that only singlet excitons were utilized to produce light with a maximum of 25% efficiency. It was a major limitation. I wish I had found some way to utilize the triplet excitons, but I didn't.

A milestone paper was published in 1999 by a group from Princeton University and the University of Southern California—almost 12 years after the first OLED paper. Baldo, Forrest and Thompson contributed to this work and here are the photos* of these three gentlemen. What they did is remarkable. They were able to utilize the triplet channel for light emission which has 75% pathway. So together with the 25% pathway for the singlet channel, they can collect almost all the excitons and turn them into light.

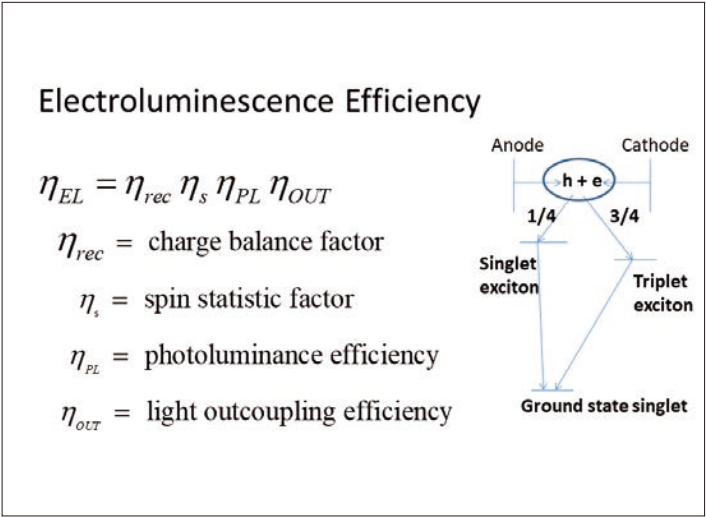


Fig. 15

*The images are omitted due to copyright protection.

この方法ではドーパントの蛍光分子は発光体として働き、それらを適当に選択することで、OLEDデバイスから様々な色を出すことができます。この方法で作れる緑と赤の光は効率がよく、寿命も長くなりました。当時は青色を作ることができませんでした。私たちがホスト材料として使っていたアルミキノリン錯体(Alq)は、緑色しか作れなかったのです。このドーピング原理は、青い光を出すことができるホストを用いて、赤・緑・青のすべての色を出すのに有用です。

私がOLEDの分野で最も貢献したことは、二層ヘテロ接合構造だと思います。これはOLEDデバイスでの実質100%の電子正孔再結合を保証するものです。再結合により励起子が生み出されますが、励起子の基底状態へと戻る過程には2つの異なる過程があります(Fig. 15)。1つは一重項状態から、もう1つは三重項状態からです。私の初期のOLED研究はすべて蛍光材料を基にしていました。つまり一重項の励起子のみを使って光を生み出して、効率は最大で25%でした。これが発光効率の限界の主な理由でした。三重項の励起子を利用する方法を模索しましたが、発見できませんでした。

私がOLEDに関する最初の論文を発表してから約12年後の1999年、南カリフォルニア大学とプリンストン大学のグループが画期的な論文を発表しました。この研究に貢献したのはバルド、フォレスト、トンプソンの3氏です。彼らの研究は注目に値するものでした。彼らは励起状態の75%を占める三重項励起を発光に利用したのです。一重項の25%と合わせると、ほとんどすべての励起子を集めて光に変換することができます。彼らは内部量子効率が100%となるOLEDを生成する方法を作り出したのです。デバイスを通るすべての電子が光を生み出せるのです。これは画期的な成功でした。そしてそのおかげで、今日私たちはOLEDディスプレイを手に入れているのです。

OLEDには寿命の問題があります。光を発するデバイスだからです。光を放出する過程で作られる励起子が、すべて光になるわけではありません。分解生成物、すなわち消光物質になるものもあります。OLEDの材料を変えることなく著しく寿命を延ばすことができます。1つの方法はデバイスの構造を変えることです。山形大学の城戸淳二教授は、複数のOLEDユニットを連続して積み上げることで、マルチスタック、つまりタンデム構造を作ることを思いつきました。それぞれのOLEDユニットを流れる電流が光を生じさせます。タンデム構造では、すべてのOLEDからの光が合わさって、より強度の強い光が作られます。そのため、この方法では電流効

They have created a pathway forward to produce OLED with 100% internal quantum efficiency. Every electron that goes through the device can produce light and this is a major breakthrough. This is also the reason we have OLED displays today.

OLED has lifetime issues because it is an emissive device. Not all excitons produced in the light emitting process will turn into light. Some turn into degradation products, or luminescence quenchers. One can drastically improve the lifetime without changing the OLED materials. One way is to change the device architecture. Professor Junji Kido from Yamagata University came up with a multi-stack or tandem structure by stacking multiple OLED units together in series. Electrical current going through each of the OLED units will produce light. Light from all the OLED units are summed to produce more intense light from the tandem structure. So, in this way the current efficiency is improved, but at the expenses of a higher drive voltage. The lifetime is much improved in tandem OLED devices because the electrochemical degradation involving excitons is reduced. This is a key development that enables OLED-TVs and other OLED technologies.

So, what do we have in OLED technology (Fig. 16)? We have low drive voltage, high efficiency, full color using the doping scheme, fundamentally faster switching than LCD, high contrast because we can turn it off to have black as black. We also have wide view angles compared to LCD. We still have lifetime problems. The lifetime will be further improved, but so far it has not prevented OLED technology from moving

OLED Key Performance Features:

- ✓ Low voltage drive
- ✓ High efficiency
- ✓ Full colors
- ✓ Fast switching time
- ✓ High contrast (black is black!)
- ✓ Wide-view angle
- ✓ Thin, light, flexible, scalable
 - But operational lifetime remains an issue (particularly blue OLED)

Fig. 16

率が改善されますが、より高い駆動電圧という代償が生じます。タンデムOLEDデバイスでは寿命は大幅に改善されます。励起子が関係する電気化学的な分解が減少するからです。これは重要な発展で、OLEDテレビや他のOLED技術が可能になりました。

では、OLED技術にはどのような特徴があるのでしょうか (Fig. 16)? 低い駆動電圧、高い効率、ドープ法を使ったフルカラー、原理的にLCDよりも速いスイッチング、“光を切る”ことができるので黒を黒として得られる高いコントラスト、またLCDよりも広い視野角などです。寿命の問題はまだ残っています。今後さらに改善されると思われますが、今のところ商品化を進めるうえで妨げにはなっていません。例えば、タンデムOLEDは寿命の改善に役立ってきました。

「OLED技術の進化」に進みましょう。みなさんに必ずしも順を追ってではありませんが、一通り説明いたします。まずはこのiPhoneを見てください。対角線の長さで表す画面サイズはおおよそ6インチで、ディスプレイはOLEDです。この小さな画面を駆動させるのに、800万個のカラーピクセルと約5000万個のトランジスタが必要です。それぞれのカラーピクセルは、素早くオン・オフを切り替えて画面に像を生成することができます。そのため、OLEDディスプレイを作るのはとても複雑です。製造するときは、数メートル四方の大きなマザーガラスから作ります。だからそれほど高価ではないのです。

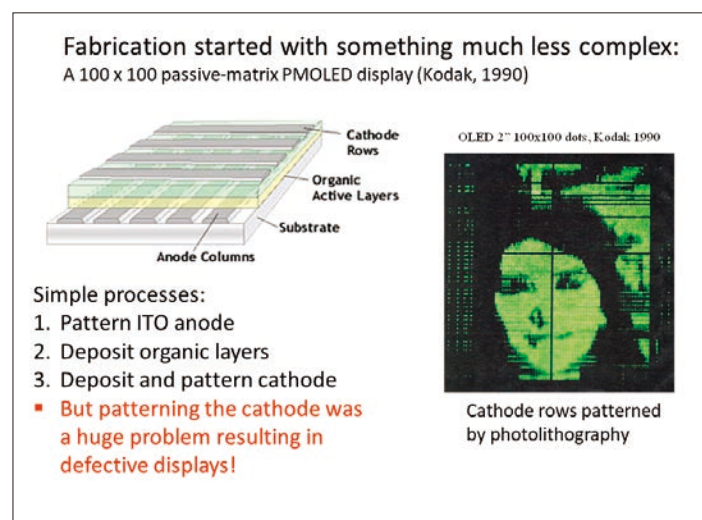


Fig. 17

forward in commercialization. For instance, stacked or tandem OLED has been useful in improving lifetime.

We come to the “Evolution of OLED Display” and I’m going to take you through it, not necessarily in sequence. First, let’s take a look at the iPhone. The iPhone measures about roughly 6 inches in diagonal and it has an OLED screen. You need 8 million color pixels and about 50 million transistors to operate this tiny screen. Each color pixel can be switched on or off rapidly to make up the images on the screen. That’s how complicated it is to make OLED displays. In manufacturing, they are made from a large mother glass measuring several square meters. That’s why they are not so expensive to make.

If you take one of the pixels and blow it up, you’ll find many multi-layer structures making up the transistor and a stack of organic layers. The substrate can be glass or plastic and there is an encapsulation layer to prevent the oxygen and moisture from coming in—to protect the OLED. The OLED stack, instead of only two layers, now may have five or six layers. So, it’s more complicated. Each of these layers has its own set of materials. I’m showing here three emitting materials for red, green and blue pixels. They are kind of complicated in molecular design. These emitting materials need to be efficient, emit at the right wavelength with suitable bandwidth and also stable. Altogether there can be as many as 20 different materials used in an OLED device, including the electrodes.

I want to take you through how we developed OLED displays from the very simple to the more complex ones (Fig. 17). Back in the 1990s at Kodak, we thought we had enough fun with OLED materials development, so we tried to make displays. The very first one we made was a passive-matrix display. It was a relatively simple one—with 100 columns × 100 rows, or 10,000 pixels instead of 8 million pixels as in the iPhone. The method to make it was first to pattern the ITO electrode on the glass support into anode columns. Next we deposited the organic layers by vapor deposition on top of the patterned ITO electrodes, and then we deposited the metal cathode layer on top of the organic layers. Afterwards, the cathode rows were patterned by photolithography.

Well, this fabrication process was easier said than done, because the photolithographic step used in patterning the top cathode rows turned out to be very difficult—as it would disrupt the underlying organic layers. So, we had a problem and the result we achieved was not good at all. The display was very defective as you can see here, but that was in the 1990s.

A few years later, I came up with a better way of patterning the cathode electrode.

もし1つのピクセルを取り出して、分解してみれば、トランジスタや積層有機薄膜の層など、多くのものが多層構造を形成していることがわかるでしょう。基板はガラスの場合もプラスチックの場合もあります。OLEDを保護するために、酸素や水分が入ってこないようにする封止材もあります。OLEDは今日では2層ではなく、5層か6層になっています。より複雑化しているのです。それぞれの層は、独自の材料からできています。ここで赤・緑・青色を出すピクセルの3つの発光材料を紹介します。分子設計は少し複雑です。これらの発光材料は(発光)効率がよく、適したバンド幅、波長で発光し、かつ、安定性もなければなりません。電極も含めると合計20の異なる材料が1つのOLEDに使われています。

OLEDディスプレイがどのように開発されたか、非常に簡単なものから複雑なものまで、ざっと説明したいと思います(Fig. 17)。1990年代、私たちはコダック社で、楽しくOLED材料を開発していたと思います。私たちはディスプレイを作ろうとしていました。最初のはパッシブマトリクス方式のディスプレイでした。それは比較的単純なもので、ピクセル数はiPhoneの800万どころではなく、100列×100行の1万でした。製作方法は、まずガラス支持基板上でITO電極をパターンニングして陽極の列を作製します。次にそのITO電極の上に蒸着により有機層を成膜し、有機薄膜の上に、金属の陰極を陽極と直交するように蒸着させます。

この製作プロセスは言うほど簡単ではありませんでした。というのも、一番上の陰極行のパターンニングで用いるフォトリソグラフィーが、下にある有機層を破壊するため、非常に難しいとわかったからです。こういった問題があったため、私たちが得られた結果は話にならないものでした。このディスプレイはご覧のように非常に不完全なものでしたが、それは1990年代のことでした。

その数年後、陰極のパターンニングにさらに適した方法を思い付きました。この方法は有機薄膜の蒸着後にフォトリソグラフィーを必要としません(Fig. 18)。基本的には、蒸着によって有機層及び金属(陰極)層を成膜する前に、ITO陽極の上に、柱を(埋め込み型のシャドウマスクとして)フォトリソグラフィーで作りました。この手順だと、有機層、金属(陰極)層はフォトリソグラフィーで破壊されることなく堆積されます。材料を斜めに蒸着させることで、金属の(陰極)層に隙間を作ることができました。柱が蒸発した金属の粒子を遮ってくれるおかげで、隙間のある陰極が作られ、ディスプレイの製作が完結しました。

日本の東北バイオニア社の研究者がこのプロセスをさらに一歩進めました。彼らは

The method does not require photolithography after the vapor deposition of the organic thin films (Fig. 18). Basically we built pillars (as built-in shadow mask) by photolithography on top of the ITO anode electrodes before depositing the organic and metal layers by vapor deposition. With this sequence, the organic and metal layers were deposited without disruption (from photolithography). By evaporating the metal from an oblique angle, we were able to produce gaps in the metal layer due to the shadowing of the pillars to form isolated cathode electrodes and complete the display fabrication.

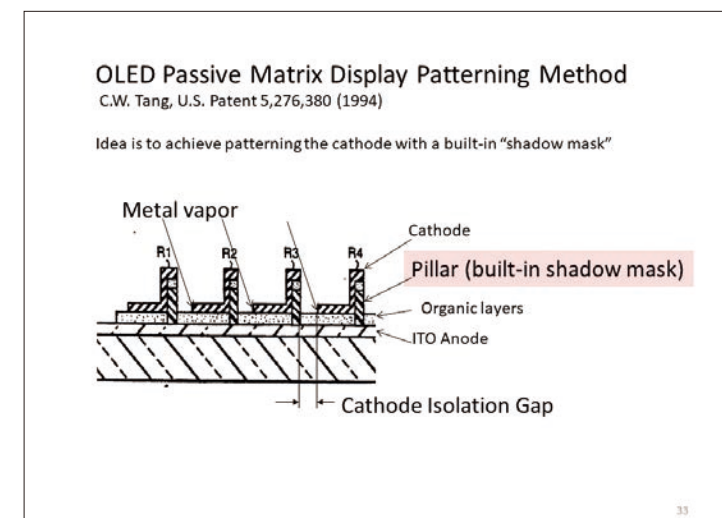


Fig. 18

In Japan Tohoku Pioneer researchers took this process one step further. They came up with a more elaborate scheme to isolate the cathode electrodes with a better pillar structure. They were even more successful and went on developing the very first passive-matrix OLED display product with their process. Motorola used these OLED displays in their cellphones and Pioneer used them for car audios.

These were simple passive-matrix displays. You need active-matrix displays to get higher resolution and larger area (Fig. 19). Passive matrix displays are limited to resolutions of a few hundred lines (a few tens of thousands of pixels). With active matrix displays, which incorporate transistor elements with each pixel in the display, the resolution can be scaled to 4K (3840×2160 pixels) or even higher.

In the late 1990s, working with other companies we began the development of active-matrix displays. We came up with a pixel scheme shown here for driving OLED displays. We were able to demonstrate very high screen uniformity with compensation

陰極を分離するのににより優れた柱の構造を用いて、さらに精巧な方法を考え付きました。彼らの成功はそれにとどまらず、彼らはそのプロセスを用いて、世界初のパッシブマトリックス方式のディスプレイを開発しました。これらのOLEDディスプレイをモトローラ社は携帯電話に、パイオニア社はカーオーディオに使用しました。

これらは単純なパッシブマトリックスディスプレイでした。高い解像度と大きな画面を実現するには、アクティブマトリックスディスプレイが必要でした(Fig. 19)。パッシブマトリックスディスプレイの解像度は数百ライン(数万ピクセル)にとどまります。アクティブマトリックスディスプレイでは、ディスプレイのそれぞれのピクセルにトランジスタが組み込まれ、解像度は4 K(3840×2160ピクセル)かそれ以上になります。

1990年代後期には、私たちは他社と共同でアクティブマトリックスディスプレイの開発を始めました。ここに示すOLEDディスプレイを駆動するためのピクセル法を考え出しました。補償回路を使って、非常に高い画面均一性を示すことができました。今日のOLED携帯電話は、1つのピクセルに対して7つのトランジスタと1つ以上の蓄積コンデンサを搭載することができます(Fig. 20)。最初の設計では、トランジスタは2つで、コンデンサは1つでした。

コダック社で、2000年代前半に私たちはアクティブマトリックスOLEDディスプレイの開発をさらに進めていきました。最初に製作したのは5インチのディスプレイ

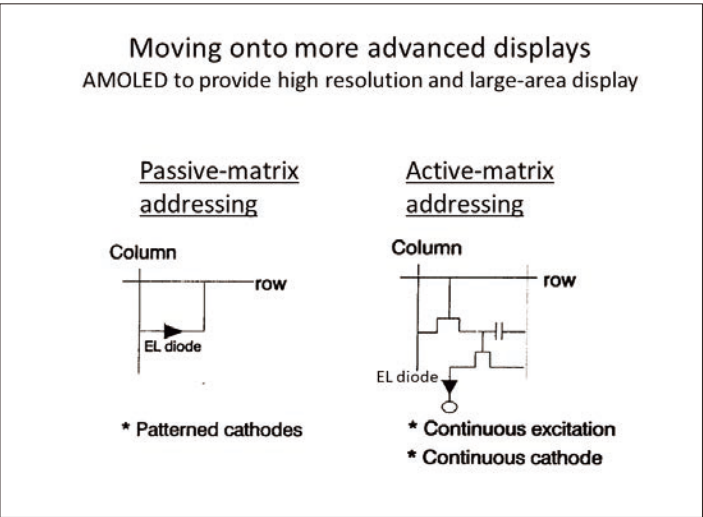


Fig. 19

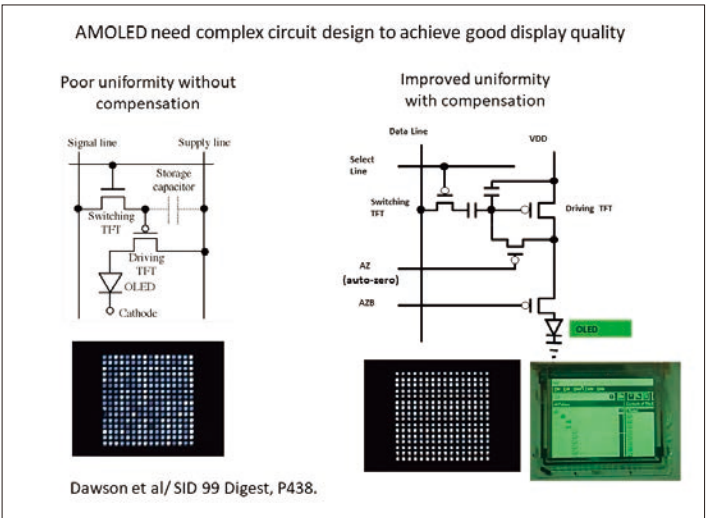


Fig. 20

circuit elements. Today in your OLED cellphones, there can be as many as seven transistors and one or more storage capacitor for each pixel (Fig. 20). In our first design, we only had two transistors and one capacitor.

At Kodak we got more involved with active-matrix OLED display development in early 2000s. The first one we made was 5-inch. We teamed up with Sanyo to make the display and were able to impress our managers with the display we made. Sanyo provided the low-temperature-polysilicon active-matrix backplane technology and Kodak provided the OLED technology. Our first active-matrix OLED products came out a few years later in 2003. We used them in Kodak's digital cameras. Unfortunately the OLED display was very costly to make, so it was not a good business and we had to stop selling the cameras and eventually abandoned OLED production. We realized that making OLED display products need many people beyond a small group of people in the research lab. The person in charge of our OLED manufacturing for Kodak then was Dr. Rajeswaran, and I want to acknowledge him for his work.

After all these years OLED displays were finally in the market. Here were two early OLED-TV products introduced around 2013 by Samsung and LG. The display quality of both TVs is more or less the same, but the production technology is very different. Samsung chose the technology, known as LTPS-TFT, for backplane and the shadow masking technology for patterning RGB pixels side by side. This approach led them to failure and they pulled their OLED-TV products out in less than a year. It turns

でした。三洋電機社と共同で製作したそのディスプレイで、管理職を唸らせることができました。三洋電機社は低温ポリシリコンを用いたアクティブマトリックスバックプレーン技術を提供し、コダック社はOLED技術を提供しました。私たちの最初のアクティブマトリックス型のOLED製品は数年後の2003年に発売されました。私たちはOLEDをコダック社のデジタルカメラに採用しました。残念ながら、OLEDディスプレイは製作に非常にコストがかかったため、ビジネスとしては成立せず、カメラの販売をやめ、最終的にはOLEDの製作もやめざるを得ませんでした。OLEDディスプレイ製品の生産には、研究室の少人数のグループだけでなく、多くの人が必要であることに気づきました。当時コダック社でOLEDの製造を担当していたのは、ラジェスワラン博士でした。彼の功績に感謝したいと思います。

こういった年月を経て、ついにOLEDディスプレイは市場に登場しました。これらは2013年頃の初期のOLEDテレビで、メーカーはサムスン社とLG社です。両社のテレビの画質はほぼ同じですが、製作技術はかなり異なっています。サムスン社はLTPS-TFT(低温ポリシリコンTFT)として知られる技術をバックプレーンに、シャドウマスク技術をRGBピクセルのパターニングに使いました。この方法はうまくいかず、サムスン社は1年もたたずしてOLEDテレビの生産から撤退しました。シャドウマスク技術は携帯電話の小さなOLEDディスプレイの製作には重要な技術でしたが、テレビの大画面ディスプレイの生産に使うには非常に難しいことが明らかになりました。シャドウマスクを用いたパターニング法を大画面に応用するのは、容易ではありません。結果として、サムスン社は低コストでOLEDテレビパネルを製作することができませんでした。それに対してLG社はずっと大きな成功を収めました。金属酸化物を配列する技術をバックプレーンとRGBパターニングに採用し、従来のカラーフィルターアレイとともに白色OLEDを使ってRBGカラーピクセルを製作しました。このアプローチでは消費電力の面で痛手を受けますが、大画面OLEDテレビパネルを低コストで量産できました。その結果、LG社は急成長し、現在では唯一のOLEDテレビパネルのメーカーになっています。

OLEDの歴史を要約する際、お話ししたいのは、最初の20年の活動が、ほぼ材料とデバイス構造の開発に費やされたということです。私自身の取り組みは、コダック社でのOLEDの発見から始まりました。私が当時使っていたベルジャー蒸着装置の写真が残っています。私はこの装置を使って、初期のほとんどのOLEDデバイスを作りました。1987年に最初の論文を発表しました。私たちは初めてパッシブマトリッ

out it's very difficult to use shadow masking technology to produce large-area displays for TVs, although it has been a key technology for producing small OLED displays for cellphones. Shadow mask patterning method is not easily scalable to large area. As a result Samsung was not able to produce OLED-TV panels at a low cost. In contrast, LG was much more successful. They used a metal oxide technology for backplane and for RGB patterning, they used white OLED with a conventional color filter array to produce RGB color pixels. Although with this approach, they would take a hit in power consumption, they were able to manufacture large OLED-TV panels with good yield and at a lower cost. As a result, LG is very successful and is the sole manufacturer of OLED-TV panels today.

In this OLED timeline summary I want to show you that the activities in the first 20 years were mostly about materials and device structure development. My own effort started with OLED discovery in Kodak. This picture* shows the belljar vapor deposition equipment that I used for making most of my early OLED devices. In 1987, the first paper was published. We made the first passive matrix OLED display—the one that didn't look too good—around 1990. A few years later came polymer OLED. At Kodak, we tried to use OLED for printing applications. The work on triplet emitters that enable 100% efficiencies appeared in 1999. The first OLED cellphone was introduced a few years later.

In the next 20 years, from 2000 to 2020, we saw OLED micro-display products, Kodak OLED digital cameras, Sony personal digital assistants (PDAs), OLED smartphones, the first OLED-TV by Sony, and mass-production of OLED displays by Samsung for smartphones. OLED-TVs from LG came in 2013 and today mass production of OLED panels has started in China.

If display history is a guide, I am sure you will be able to enjoy OLED-TVs, smartphones, and other OLED products at a much lower price in the near future. This picture* is the latest 88" OLED-TV made by LG. It is the largest OLED-TV ever made and it is rollable. I am also sure there will be new OLED developments by other companies as well in the future.

It has been a very fulfilling journey of personal and scientific discoveries for me, starting from a small village in Hong Kong and ending up in the discovery of OLED (Fig. 21). Along the way, I have been very fortunate to have the support of three strong women—my grandmother, my mother and my wife, and my dear family. Thank you very much.

*The images are omitted due to copyright protection.

クスOLEDディスプレイを——それほど良い物には見えませんでした——1990年頃に製作しました。その数年後、高分子OLEDが登場しました。コダック社ではOLEDを印刷に応用しようとしていました。100%の効率を可能にする三重項発光体についての研究が、1999年に登場しました。その数年後、最初のOLED携帯電話が商品化されました。

2000年から2020年の20年間にはOLEDマイクロディスプレイ製品、コダック社のOLEDデジタルカメラ、ソニー社の携帯情報端末(PDA)機能付きのOLEDスマートフォン、ソニー社から発売された最初のOLEDテレビ、サムスン社によるスマートフォン向けOLEDディスプレイの量産などがありました。LG社が2013年からOLEDテレビに参入し、最近では中国でのOLEDパネルの大量生産が始まっています。

これまでのディスプレイの歴史を考えれば、OLEDテレビやスマートフォンやその他のOLED製品を、近い将来もっと低価格で手に入れることができるようになるでしょう。LG社製の最新の88インチOLEDテレビは、これまで製造された中で最も大きなテレビで、丸めることもできます。将来、他の企業によって新しいOLEDが開発されるだろうとも私は確信しています。

香港の小さな村から始まり、OLEDの発見に行きつくまで、個人的にも科学的にも非常に充実した発見の旅をしてきました(Fig. 21)。ここに至るまで、とても幸いなことに、祖母、母、妻という3人のしっかりした女性たちと大切な家族に支えられてきました。ありがとうございました。



Fig. 21

稲盛財団2019——第35回京都賞と助成金

発 行 2020年10月31日

制 作 公益財団法人 稲盛財団

〒600-8411 京都市下京区烏丸通四条下ル水銀屋町620番地

Tel: 075-353-7272 Fax: 075-353-7270

E-mail press@inamori-f.or.jp URL <https://www.inamori-f.or.jp>

ISBN978-4-900663-35-0 C0000