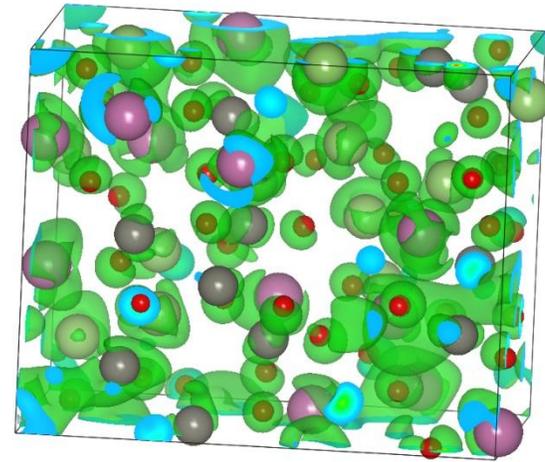
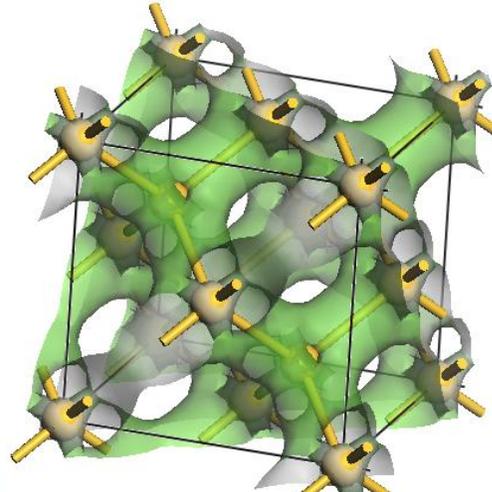
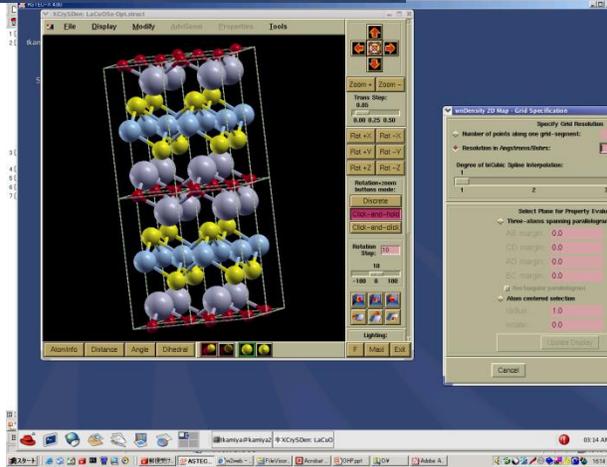
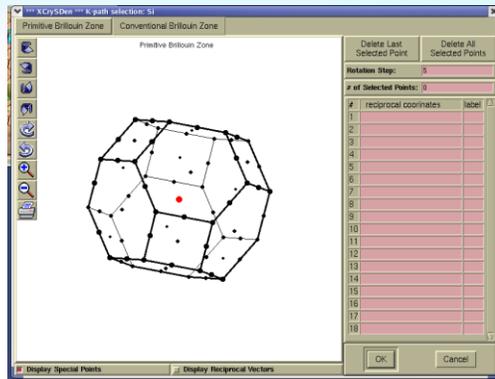
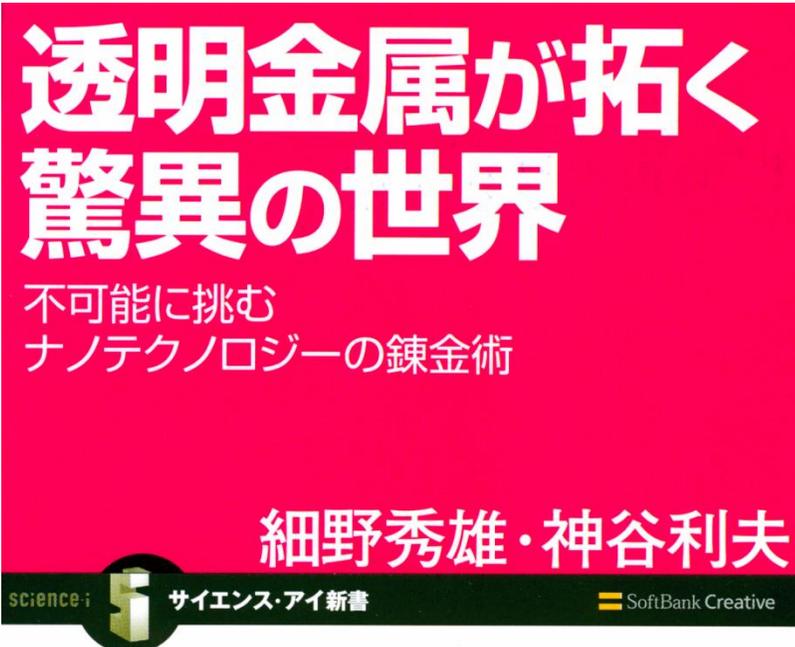


半導体・導電体材料

物質理工学院 材料系 無機分野
元素戦略MDX研究センター
神谷利夫



参考図書：透明金属が拓く脅威の世界



文科省「元素戦略」の切り札！

シリコン・光ファイバーを超える

「透明酸化物半導体」の
すべてを凝縮 日本のナノテクは
ここまでの

科学とITの

仕組み 理論 テクノロジーが

図解でよくわかる

サイエンス・アイ新書
創刊!

第1章 プロローグ：材料研究が持つ可能性

第2章 透明金属の用途

第3章 透明ってどういうこと？
金属と絶縁体の違いは何？

第4章 電気を流すもの、流さないもの

第5章 色と電気伝導度の関係

第6章 新しい透明金属と応用

第7章 ガラスが高性能の
透明トランジスタに変身

第8章 セメントを透明な半導体、
さらに金属に変身させる

第9章 エピローグ：材料科学への誘い

何を学んでほしいか

- ・ **なぜ半導体が重要なのか**
- ・ **なぜ、透明であることと、高い電気伝導性を両立するのが難しいか**
 - * 物質の色は何で決まっているか: バンドギャップ
- ・ **どうしたら透明な物質に、高い電気伝導性を付与できるか**
ドーピング
- ・ **透明導電体にはどのような物質があるか**
ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$)、ZnO、 SnO_2
- ・ **透明半導体酸化物はどのようなところにつかわれているか**
太陽電池、ディスプレイ、タッチパネル
アモルファス酸化物半導体と平面ディスプレイ

Google NotebookLM

<http://d2mate.mdxes.iir.isct.ac.jp/D2MatE/ai/notebooklm.html>

NOTEBOOKLM (一般公開)

NotebookLM

公開対象: 学会参加者、講義聴講者等

- [セラミックス概論2025 「透明導電体」講義](#) (講義資料)
 - [酸化物半導体の基礎 \(AMFPD'25\)](#) (チュートリアル資料、関連論文含む)
 - [数値計算 \(計算材料学特論\)](#) (講義資料のみ)
 - [結晶工学スクール2025 バンド構造を用いた材料開発\(実践編\)](#) (スクール資料・スライドのみ)
日本語解説 (NotebookLMで生成): 
 - [生成AI・プログラミング一般](#) (講義・チュートリアル資料のみ)
 - [物理・科学一般\(量子力学、バンド理論、統計力学、固体科学、機器分析\)](#) (講義資料等: 固体化学、固体物理、統計力学(C)、機器分析概論、COE講義、チュートリアル)
-

NotebookLMの特徴

- ユーザーが投入した情報源のみを参照して、Geminiが回答を返します。
そのため、ハルシネーションが起こりにくくなっています。

レポート課題 (7/16)

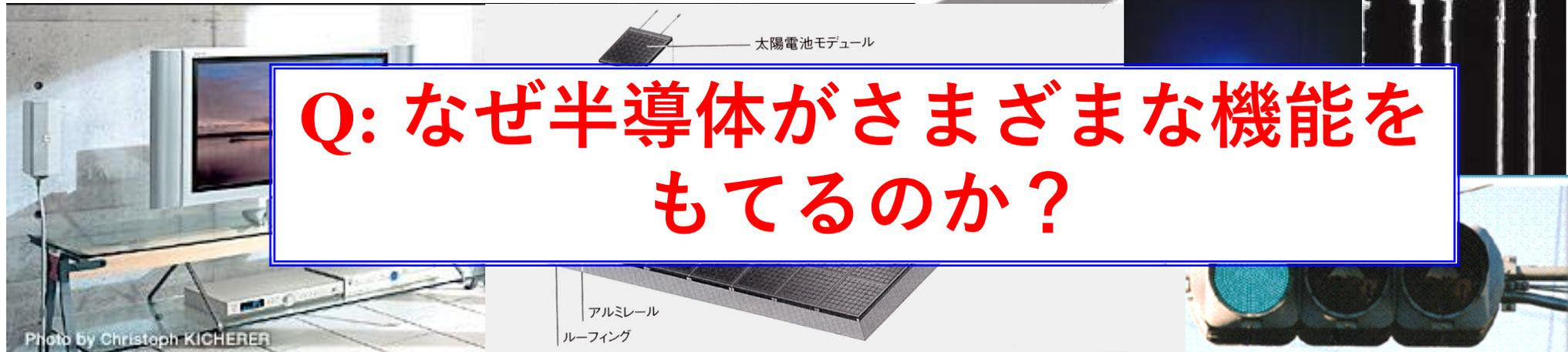
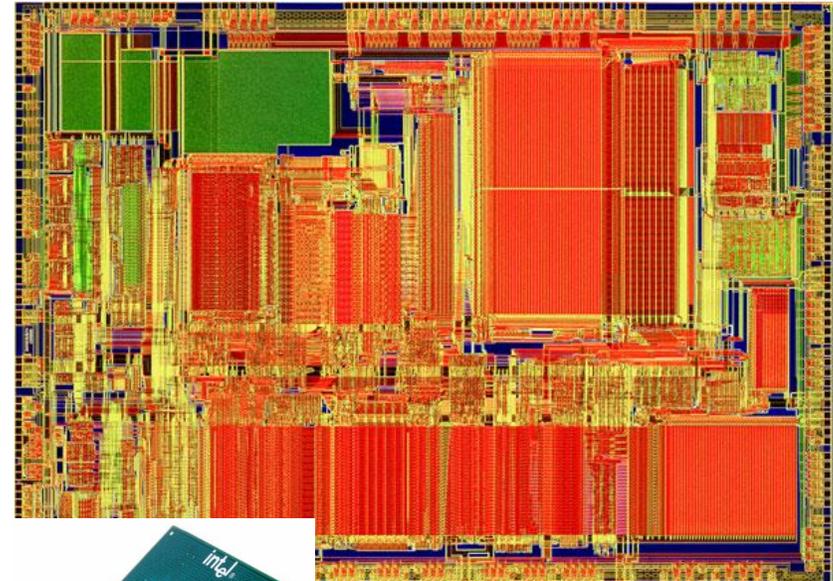
- 解答の電子ファイル (Word、Text、写真など) を LMS から提出
期限: 2025/7/18

次の2つの問題から1つを選んで答えよ

1. 前ページのNotebookLM ノートブックから1つを選び、好きな質問をし、その回答を記せ。
回答には、どのノートブックを選んだかを明記すること。
2. In_2O_3 の電気伝導度を上げるためにはどうしたらよいか、2行以内で述べよ。
すでに確立されている方法でなくても、自分自身でのアイデアを述べても構わないが、正誤は理にかなっているかどうかで判断する。

多くの機能デバイスが半導体を使って作られている

ダイオード
トランジスタ (CPU, メモリーetc.)
発光素子
光センサー
熱電素子 (発電、温度センサー)
太陽電池
光触媒



Q: なぜ半導体がさまざまな機能をもてるのか？

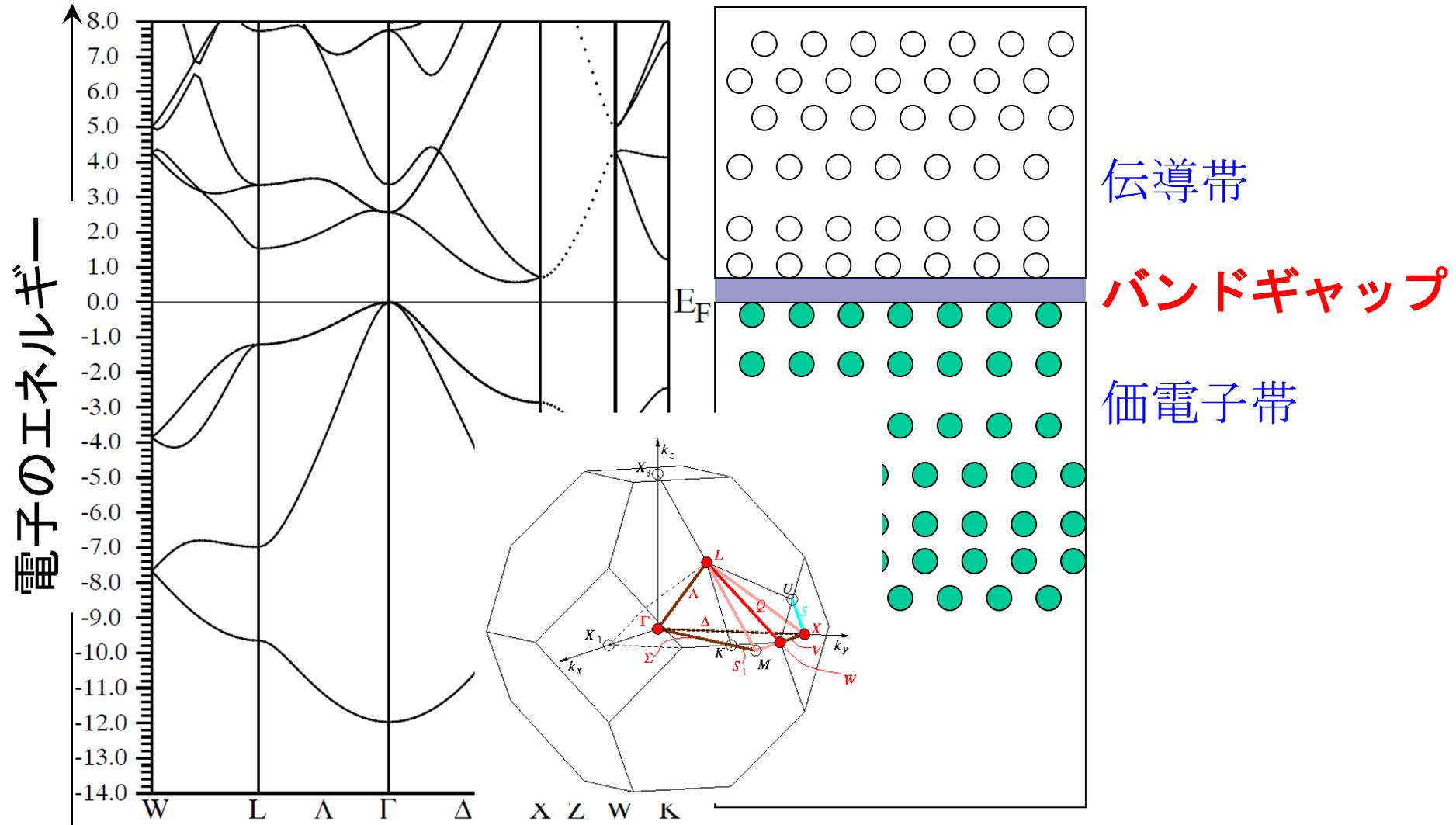
電子構造の重要性

酸化物：多様な**元素**、**結晶構造**

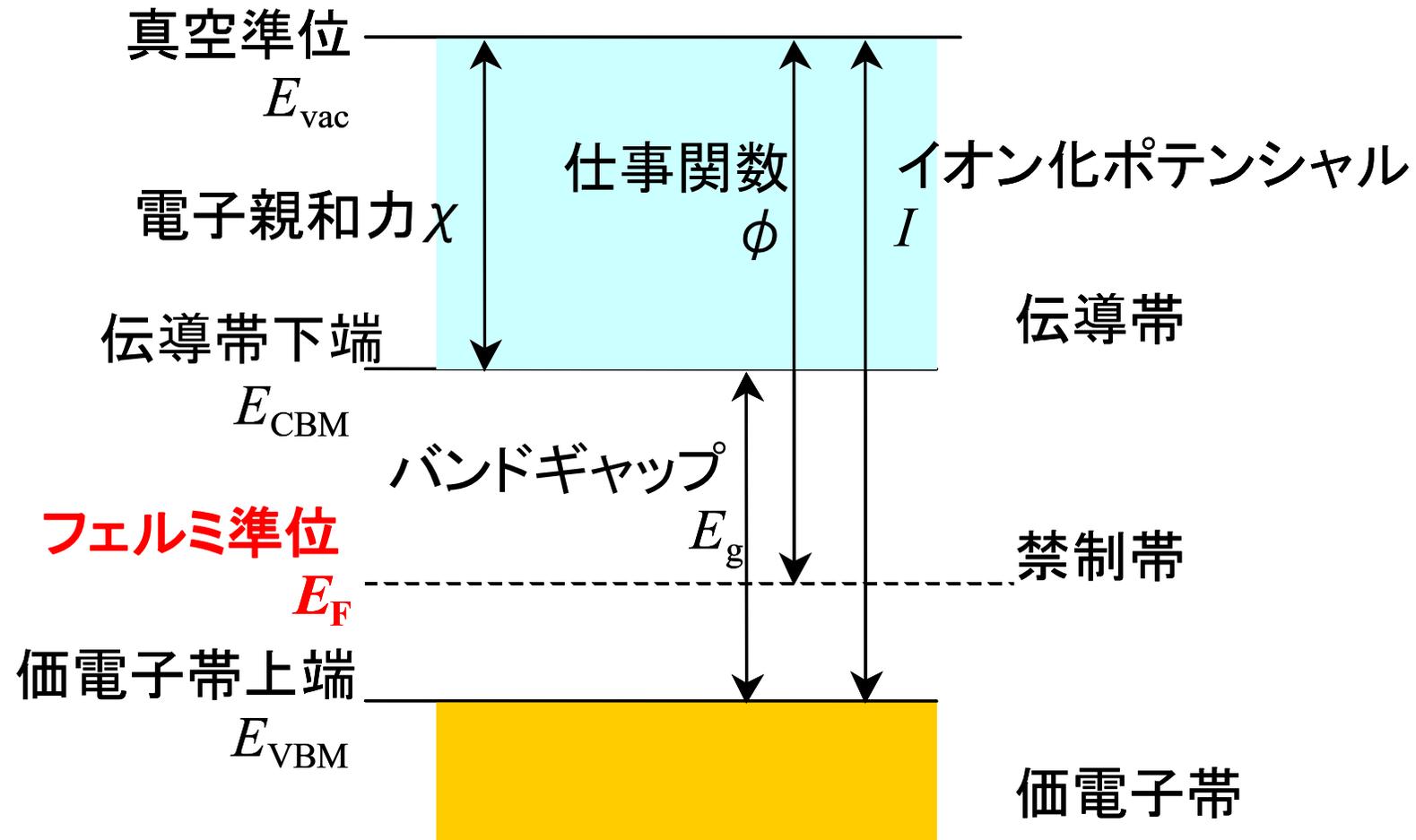
多様な機能：**化学**、**電子**、**光**、**磁気**

- ・**化学反応** : 電子の**授受**
 - ・**電子機能** : 電子の**移動**、**分布**の変化
 - ・**光機能**(吸収・発光) : 電子の準位間**遷移**
 - ・**磁気機能** : **スピン**配列
-
- ・**材料の機能** : **電子構造**と密接に関係している
 - ・**電子構造** : **結晶構造**・**組成**によって決まる

シリコンの電子構造



半導体の電子構造を決定するパラメーター



いかにして高い電気伝導度を実現するか？

$$j = env, v = \mu E$$

$$\sigma = en\mu$$

1. 移動度 $\mu = e\tau / m^*$

有効質量



運動量緩和時間

波動関数の

大きな重なりにより m^* 小

2. キャリア密度 n

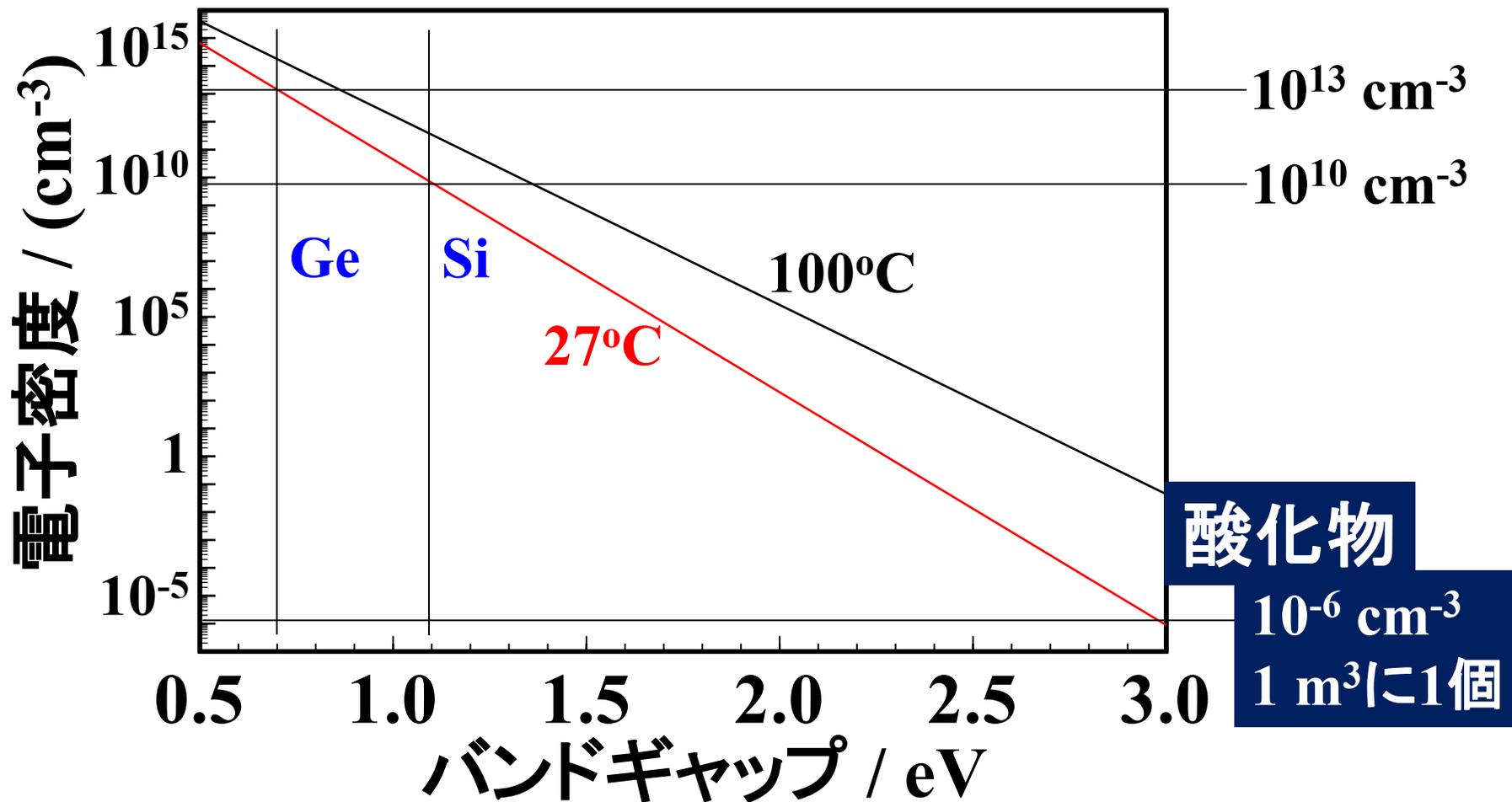
ドーピング濃度

活性化エネルギー

なぜ半導体がいろいろな機能を持つのか

$$N_{e,h} = \sqrt{\frac{N_C N_V}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

Siの原子密度
 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$



なぜ半導体がいろいろな機能を持つのか

・バンドギャップが 0.1 eV 増えると、電子密度は 1/10 になる

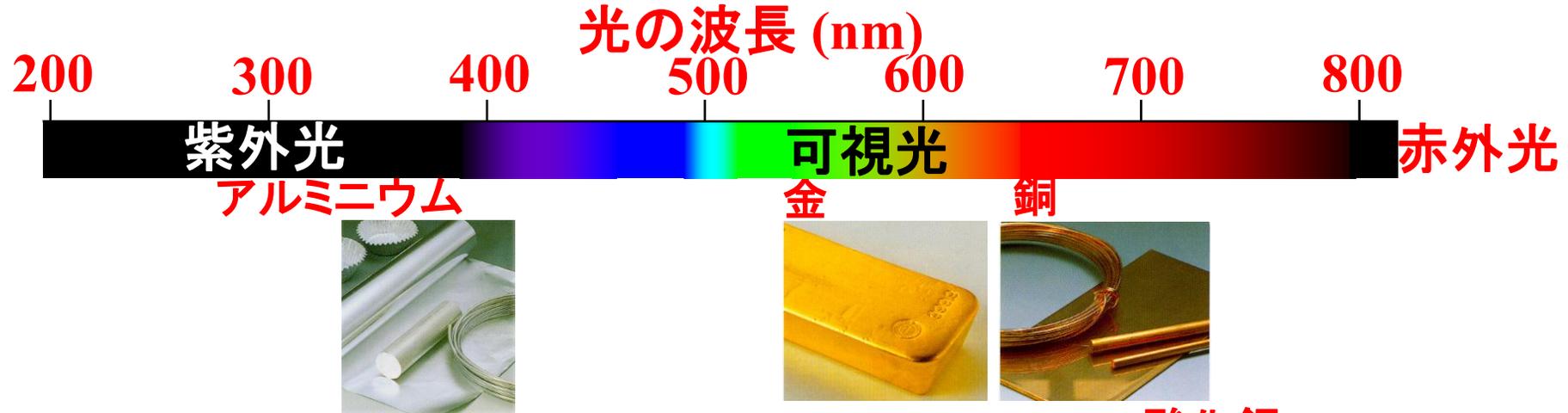
| | バンドギャップ | 電子の数 |
|-------|------------------------------|-----------|
| 金属: | 0 | 10^{23} |
| 半導体 | | |
| シリコン: | 1.1 | 10^{10} |
| | 1/10000 のドーパントで 電子密度は 5億倍 | |
| 絶縁体 | | |
| ZnO: | 3.4 | 10^{-6} |

何を学んでほしいか

- ・なぜ半導体が重要なのか
- ・なぜ、透明であることと、高い電気伝導性を両立するのが難しいか
 - * 物質の色は何で決まっているか: バンドギャップ
- ・どうしたら透明な物質に、高い電気伝導性を付与できるか
ドーピング
- ・透明導電体にはどのような物質があるか
ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$)、ZnO、 SnO_2
- ・透明半導体酸化物はどのようなところにつかわれているか
太陽電池、ディスプレイ、タッチパネル
アモルファス酸化物半導体と平面ディスプレイ

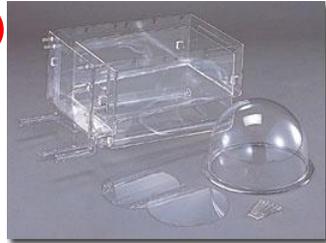
金属、半導体、絶縁体...

金属：光沢がある、電気がよく流れる、たたくと延びる

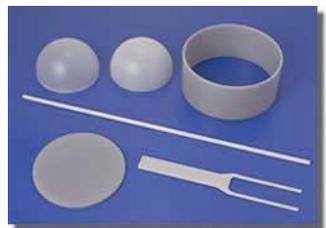


絶縁体：電気が流れない

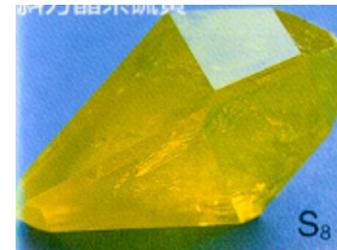
ガラス (SiO₂)



アルミナ
サファイア
ルビー
(Al₂O₃)

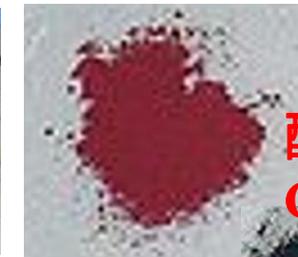


硫黄



酸化銅(I)

Cu₂O



酸化銅(II)

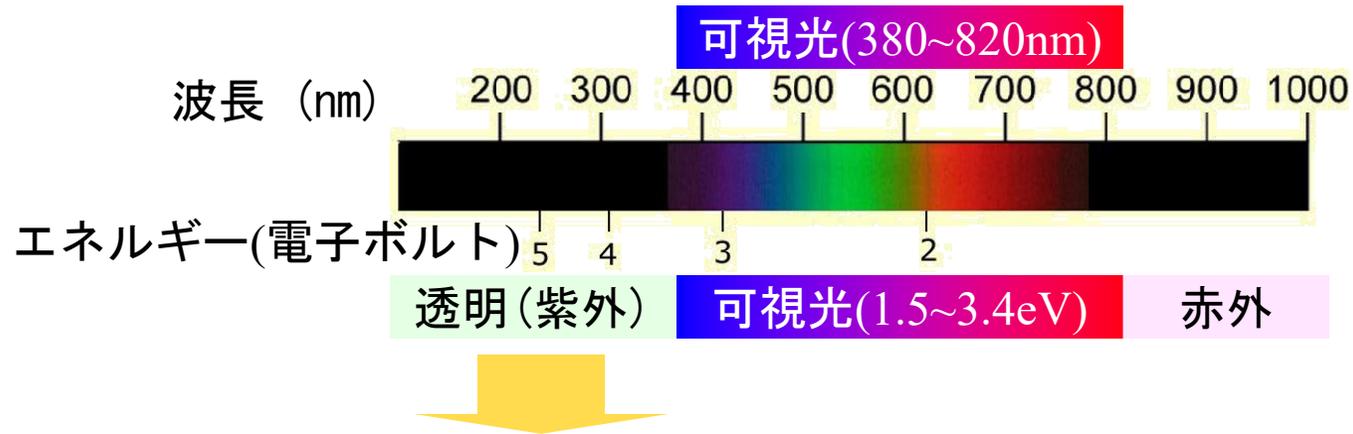
CuO



$$\lambda \text{ [nm]} = 1240 / E_g \text{ [eV]}$$

半導体は ???

透明な半導体は難しい



透明: バンドギャップが 3 eV以上

| | バンドギャップ | 電子の数 |
|-------|---------|-----------|
| シリコン: | 1.1 | 10^{10} |
| ZnO: | 3.4 | 10^{-6} |

酸化物なんて
半導体になるはずがない！！

透明で電子活性な材料をつくるには？

- ・教科書の絶縁体の定義

~~バンドギャップが大きい物質の電気伝導度は小さい~~

- ・電子伝導性

キャリア濃度と移動度

(ドーピングのしやすさと有効質量、散乱時間)

- ・なぜバンドギャップが大きいと高い電子伝導が得られにくいのか？

キャリアが不安定になる

(格子緩和、欠陥生成などにより動けなくなる)

電子構造をうまく設計すれば、

大きいバンドギャップと

高効率キャリアドーピング

が両立する

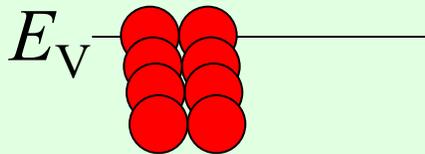
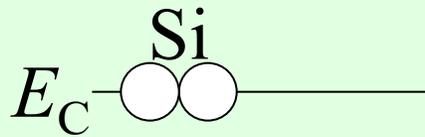
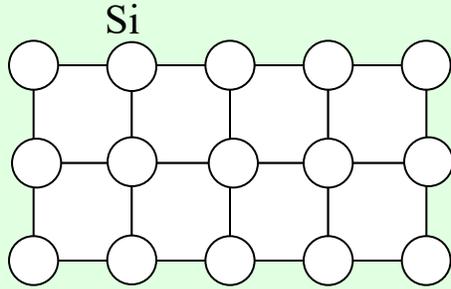
何を学んでほしいか

- ・なぜ半導体が重要なのか
- ・なぜ、透明であることと、高い電気伝導性を両立するのが難しいか
 - * 物質の色は何で決まっているか: バンドギャップ
- ・どうしたら透明な物質に、高い電気伝導性を付与できるか
ドーピング
- ・透明導電体にはどのような物質があるか
ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$)、 ZnO 、 SnO_2
- ・透明半導体酸化物はどのようなところにつかわれているか
太陽電池、ディスプレイ、タッチパネル
アモルファス酸化物半導体と平面ディスプレイ

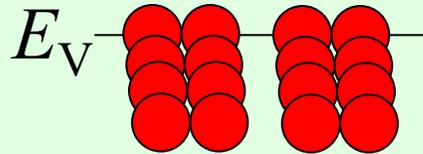
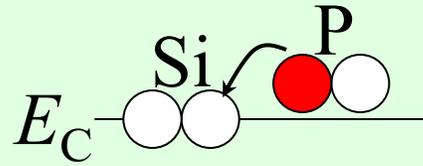
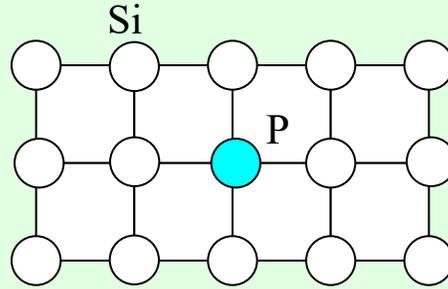
シリコンへのn型ドーピング

水素様原子モデル: 透明導電膜の技術 改訂第2版第3刷 p.62

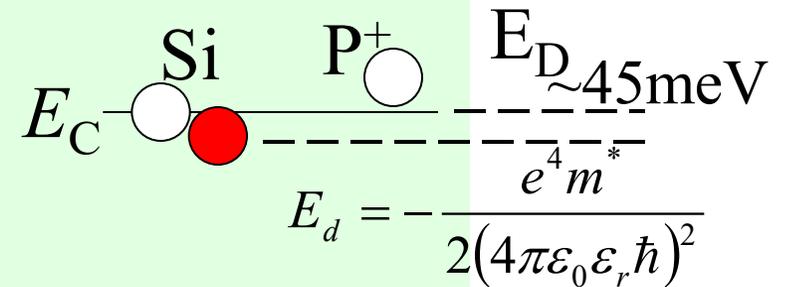
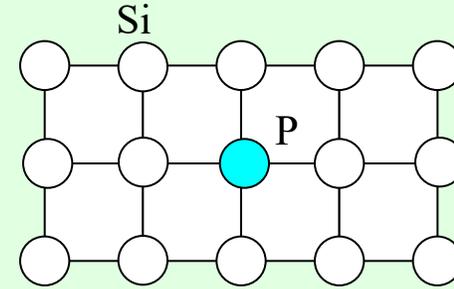
Si



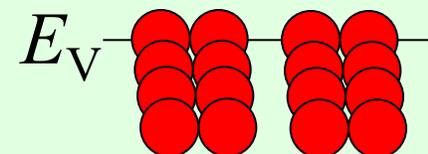
Si:P



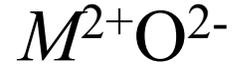
浅いドナー準位



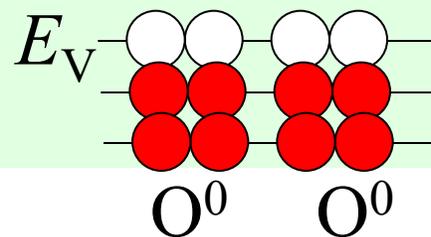
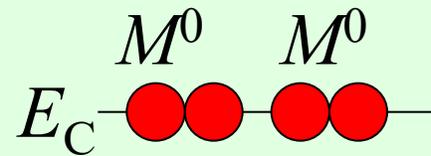
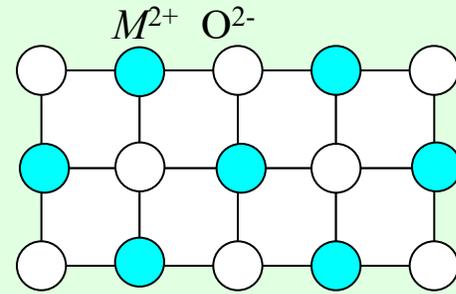
$$= \frac{m^*}{m} \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right)^2 E_H \frac{1}{n^2}$$



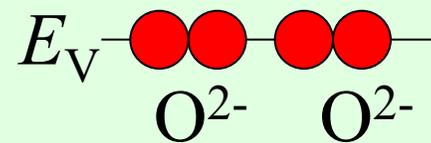
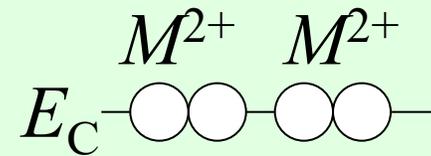
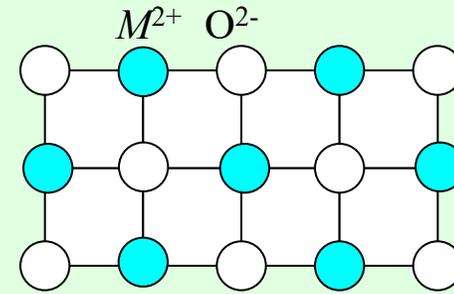
イオン結晶の電子構造の形成



中性原子



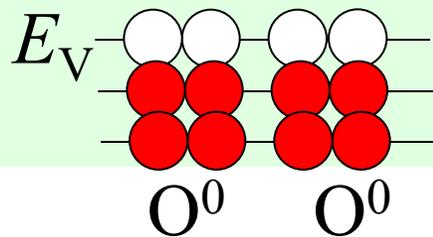
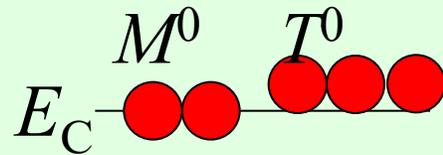
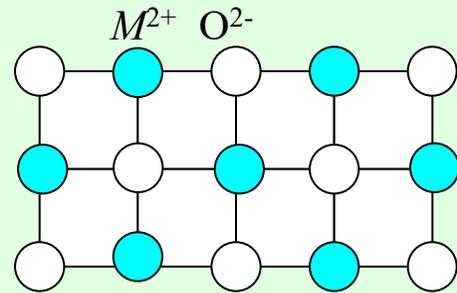
電荷移動後



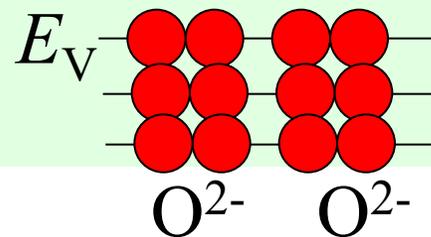
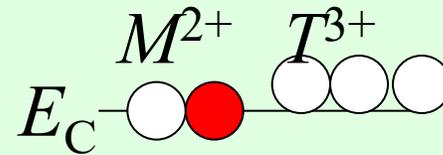
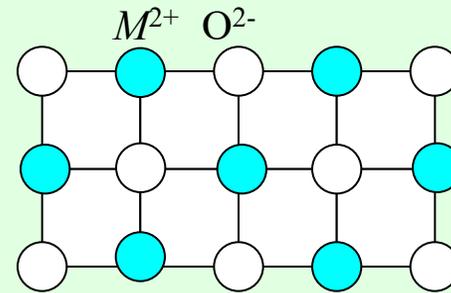
異価数イオンによるドーピング



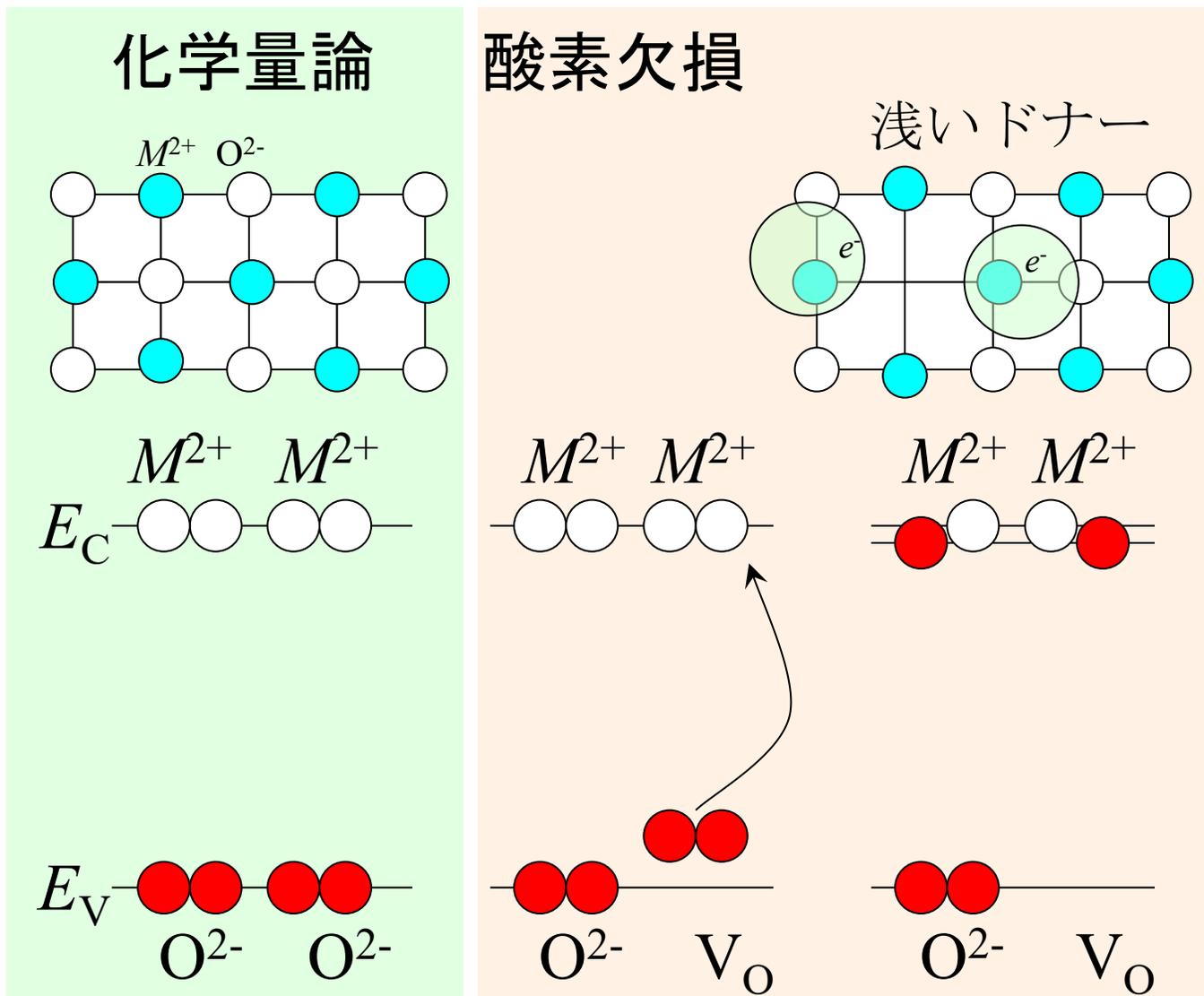
中性原子



電荷移動後



酸素欠損によるキャリア生成



酸化物におけるドーピング

置換: イオン価数大 \Rightarrow 電子ドーブ



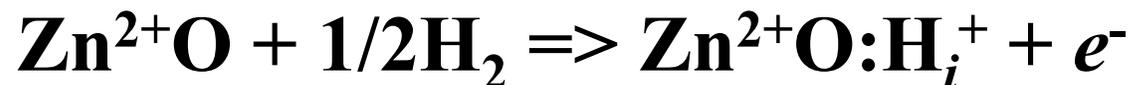
酸素欠損 (陽イオン過剰): 電子ドーブ



陽イオン欠損 (酸素過剰): 正孔ドーブ



水素: 電子ドーブ



何を学んでほしいか

- ・なぜ半導体が重要なのか
- ・なぜ、透明であることと、高い電気伝導性を両立するのが難しいか
 - * 物質の色は何で決まっているか: バンドギャップ
- ・どうしたら透明な物質に、高い電気伝導性を付与できるか
ドーピング
- ・透明導電体にはどのような物質があるか
ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$)、 ZnO 、 SnO_2
- ・透明半導体酸化物はどのようなところにつかわれているか
太陽電池、ディスプレイ、タッチパネル
アモルファス酸化物半導体と平面ディスプレイ

透明導電性酸化物 (TCO) の例

実用化されているTCOはすべてn型半導体

$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ In^{3+} 位置に Sn^{4+} **ITO** (Tin-doped In_2O_3)

電気伝導度はTCO中最大

還元弱い (水素プラズマで黒化)

ディスプレイ、タッチパネル、薄膜太陽電池の上部電極

$\text{ZnO}:\text{Ga}$ Zn^{2+} 位置に Ga^{3+} **GZO**

$\text{ZnO}:\text{Al}$ **AZO**

透明性が高い

化学耐性が高い

薄膜太陽電池の下部電極

$\text{SnO}_2:\text{F}$ O^{2-} 位置に F^- **FTO** (F-doped tin oxide)

$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ Sn^{4+} 位置に Sb^{5+} **ATO** (Sb-doped tin oxide)

化学耐性が高い

色素増感太陽電池の電極

バンドギャップを決定する一般的な法則

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|----------|----------|----------|
| 1 | H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | He 2 |
| 2 | Li 3 | Be 4 | | | | | | | | | | | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | Ne 10 |
| 3 | Na 11 | Mg 12 | | | | | | | | | | | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | Ar 18 |
| 4 | K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | Kr 36 |
| 5 | Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | I 53 | Xe 54 |
| 6 | Cs 55 | Ba 56 | *Ln | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | Xe 86 |
| 7 | Fr 87 | Ra 88 | **Ac | Rf 104 | Db 105 | Sg 106 | Bh 107 | Hs 108 | Mt 109 | Ds 110 | Rg 111 | Cn 112 | Uut 113 | Uuq 114 | Uu 115 | | | |

典型非金属元素
典型金属元素
遷移金属元素

VBM浅い

CBM深い

VBM浅い

CBM深い

金属イオン: CBMを形成

(周期表で左側へ: CBMが深くなり、Eg小)

周期表で下側へ: CBMが深くなり、Eg小

CBMが拡がり、高移動度n型酸化物

陰イオン: VBMを形成

周期表で左側へ: VBMが浅くなり、Eg小

周期表で下側へ: VBMが浅く、高移動度p型酸化物

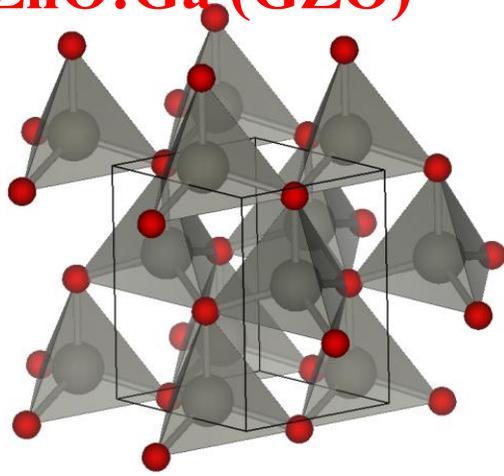
TCOに使われる元素：“TCO御三家”

- ・ ホスト材料のバンドギャップが 3.0 eV以上
- ・ 適当なドーパントによってキャリア濃度を上げられる

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|--|--|
| 1 | H 1 | | | | | M | 透明酸化物 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Li 3 | Be 4 | | | | | | | | | | | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | | | |
| 3 | Na 11 | Mg 12 | | | | | | | | | | | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | | | |
| 4 | K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | | | |
| 5 | Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | I 53 | | | |

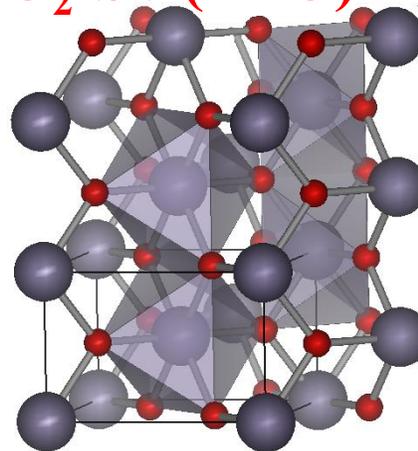
ZnO:Al (AZO)

ZnO:Ga (GZO)

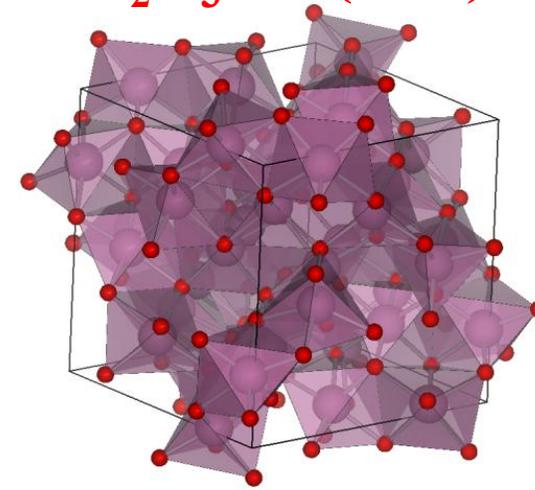


SnO₂:F (FTO)

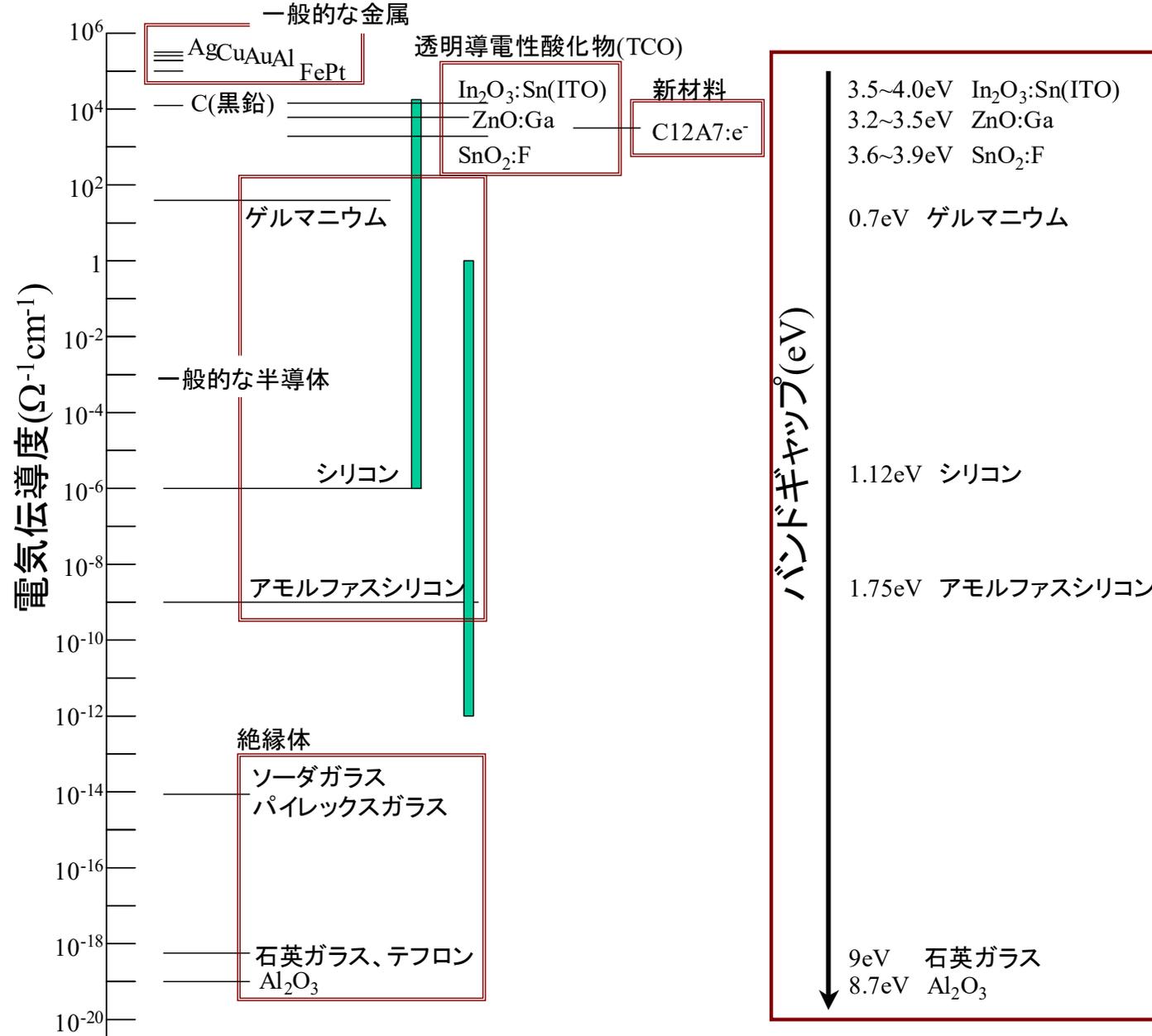
SnO₂:Sb (ATO)



In₂O₃:Sn (ITO)



電気伝導度



何を学んでほしいか

- ・なぜ半導体が重要なのか
- ・なぜ、透明であることと、高い電気伝導性を両立するのが難しいか
 - * 物質の色は何で決まっているか: バンドギャップ
- ・どうしたら透明な物質に、高い電気伝導性を付与できるか
ドーピング
- ・透明導電体にはどのような物質があるか
ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$)、ZnO、 SnO_2
- ・透明半導体酸化物はどのようなところにつかわれているか
太陽電池、ディスプレイ、タッチパネル
アモルファス酸化物半導体と平面ディスプレイ

透明導電性酸化物 (TCO) が使われている機器

平面テレビ(LCD,PDP,有機EL)

タッチパネル



薄膜太陽電池

産総研, メガソーラータウン



東急電鉄 すすかけ台駅

ボーイング787 Dreamliner

Newton2011年12月号



LEDライト
ヘッドアップディスプレイ
タッチパネル
エレクトロクロミックガラス

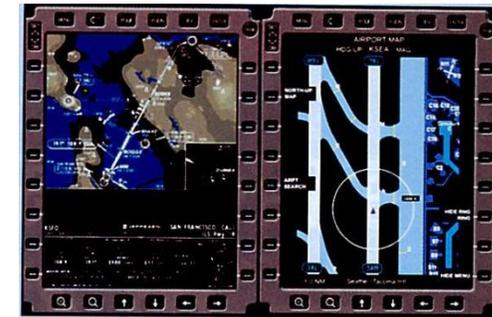


B787のcockpit。両側の席ともにヘッドアップ・ディスプレイ(写真中の矢印)がつけられたのは、B787がはじめてだ。中央の五つのディスプレイはそれぞれ切りかえることができ、一部が故障して使えなくなってもほかで代用が可能だ。操縦桿(コントロールホイール、座席正面)を前後に押し引きすることで機首の上下(水平尾翼のエレベーターを動かす)を、左右にまわすことで機体の傾き(旋回するときの動き、主翼のエルロンなどを動かす)を制御する。足下のペダルでは、機首の左右(垂直尾翼のラダーを動かす)を制御する。写真は2011年9月28日に羽田空港に到着した初号機を撮影。

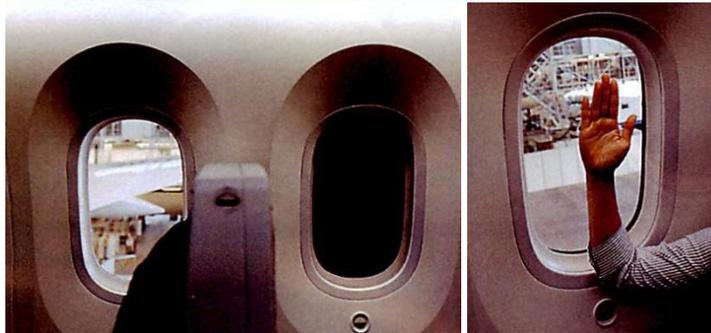


五つあるモニターの一つ。cockpit(左ページ写真)の中央右側のディスプレイを拡大した写真。画面の下3分の1に表示されているのは、飛行機がこれから飛行する高度の情報。このような垂直(鉛直)方向の情報を表示するのは、B787がはじめてだという。

ヘッドアップ・ディスプレイ。視線を下げなくても情報がえられる透明の表示器。高度など、必要な情報を選んで表示できる。パイロットが座った位置からだけ表示が見え、左ページの写真では画面を見ることができない。上の写真は座席から撮影した写真。



パイロットの脇(外側)にある端末。タッチパネルで操作できる。飛行経路がわかる地図や、空港の情報などを見ることができる。従来、厚い冊子となっていた情報を端末で自由に見ることが可能となった。地上と交信することで、最新の情報に簡単に更新できる。



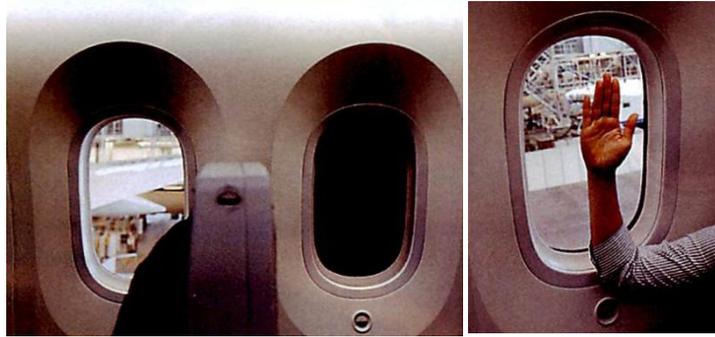
電子式のシェード(日よけ)

B787の客室の窓を機内から撮影した写真。左側の写真が、電子式シェードのいちばん明るい場合と暗い場合を比較したもの。窓の下のボタンで5段階の明るさに調整できる。ボタンを押すとゆっくりと窓に色がついていき、暗くなる。写真では見にくいですが、一番暗くした状態でも約5%の透過度があり、外の景色がうっすら見える。B787の窓は大きさが従来より約1.3倍ほどになった(右側の写真参照)。ANAによると、窓が大きくなったことで、窓際の席だけでなく、中央の席に座っても水平線が見えるのだという。

ボーイング787 Dreamliner

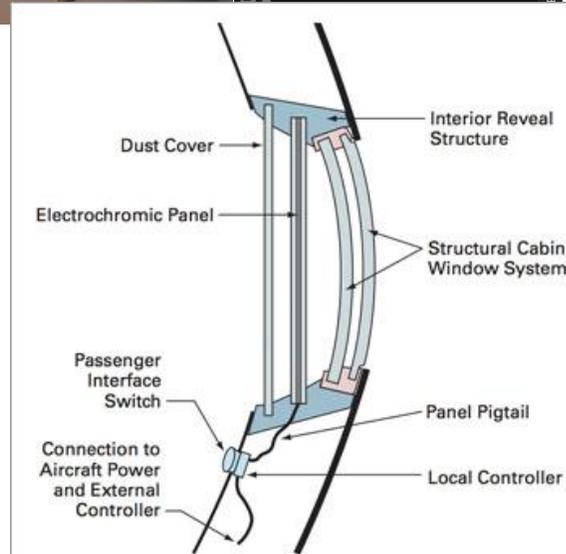
Newton2011年12月号

B787のコックピット。両側の席ともにヘッドアップディスプレイ（写真中の矢印）がついたのは、B787がはじめてだ。中央の五つのディスプレイはそれぞれ切りかえることができ、一部が故障して使えなくなってもほかで代用が可能だ。操縦桿（コントロールホイール、座席正面）を前後に押し引きすることで機首の上下（水平尾翼のエレベーターを動かす）を、左右にまわすことで機体の傾き（旋回するときの動き、主翼のエロンなどを動かす）を制御する。足下のペダルでは、機首の左右（垂直尾翼のラダーを動かす）を制御する。写真は2011年9月28日に羽田空港に到着した初号機を撮影。



電子式のシェード（日よけ）

B787の客室の窓を機内から撮影した写真。左側の写真が、電子式シェードのいちばん明るい場合と暗い場合を比較したもの。窓の下のボタンで5段階の明るさに調整できる。ボタンを押すとゆっくりと窓に色がついていき、暗くなる。写真では見にくいですが、一番暗くした状態でも約5%の透過度があり、外の景色がうっすら見える。B787の窓は大きさが従来より約1.3倍ほどになった（右側の写真参照）。ANAによると、窓が大きくなったことで、窓際の席だけでなく、中央の席に座っても水平線が見えるのだという。



<http://optpelec.blog.fc2.com/blog-entry-540.html>

GENTEX Corp.

<http://www.gentex.com/aerospace/aircraft-windows>

TCO / gel のエレクトロクロミック材料 / TCO

将来のディスプレイは透明になる？

ヘッドアップディスプレイ



F/A-18C Hornet
Wikipedia, Japanese
<http://ja.wikipedia.org/>



Defi-Link VSD CONCEPT
Nippon Seiki Co. Ltd.
<http://www.nippon-seiki.co.jp/defi/>

未来の姿？

Time Machine, 2002, Dreamworks



Minority Report, 2002, 20Century Fox



透明窓ディスプレイ



酸化物（セラミックス）の特徴は？

セラミックス: セメント、ガラス、茶碗

1. 電気を流さない
2. 脆い
3. 構造材料としてしか使えない

酸化物（セラミックス）の特徴は？

セラミックス: セメント、ガラス、茶碗

1. 電気を流さない

電気を流す酸化物はたくさんある

2. 脆い

3. 構造材料としてしか使えない

酸化物（セラミックス）の特徴は？

セラミックス: セメント、ガラス、茶碗

1. 電気を流さない

電気を流す酸化物はたくさんある

2. 脆い

曲がる酸化物はたくさんある

3. 構造材料としてしか使えない

酸化物も曲がる

長崎ポッペン



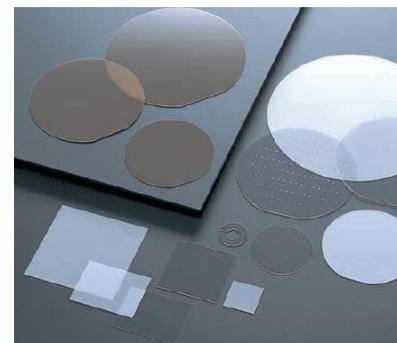
<http://www.idemitsu.co.jp/moconet/archives/spot/gangu/line2.html>

セラフレックス (ZrO₂)
(日本ファインセラミックス)

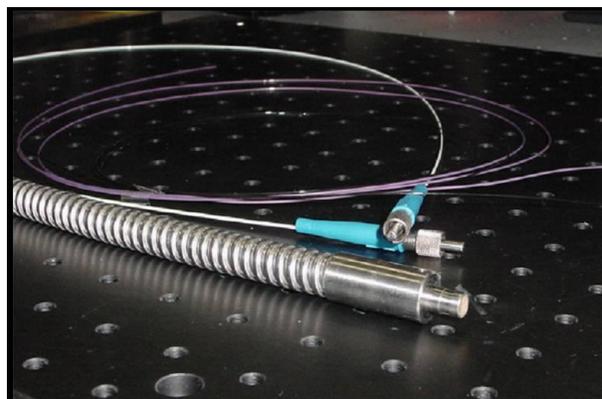


http://www.japan-fc.co.jp/products/pro_4.html

単結晶サファイア
(京セラ)



ガラスファイバー



フレキシブルガラス
(日本電気硝子)



曲がったディスプレイ

サムスン Galaxy Note
Edge (2014/10/8)(LCD,
5.6", 2,560×1,440)



65/75" 曲がった液晶TV
3,840×2,160
(Sony, 2014/9)



曲がった液晶
(AUO, SID2014)



サムスン Gear S (2014/10?)
(Curved OLED, 2.0",
360×480)



85" 曲率可変有機EL TV
3,840×2,160
(Samsung, CES2014)



酸化物（セラミックス）の特徴は？

セラミックス: セメント、ガラス、茶碗

1. 電気を流さない

電気を流す酸化物はたくさんある

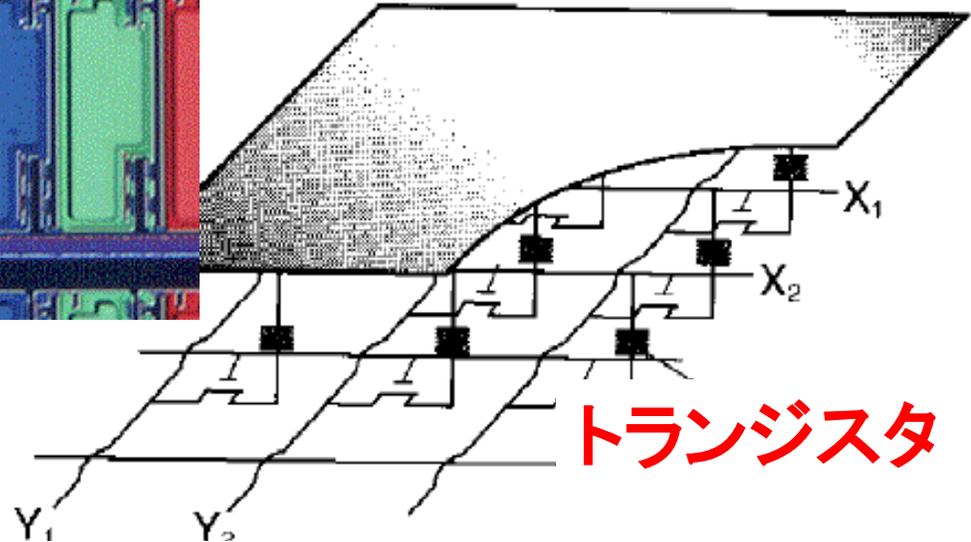
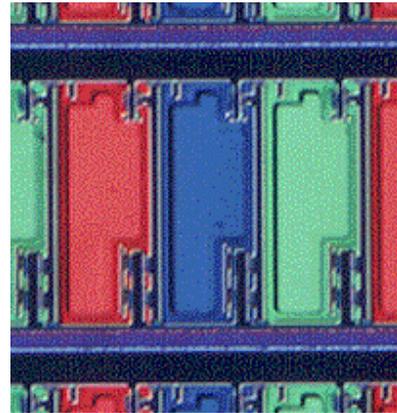
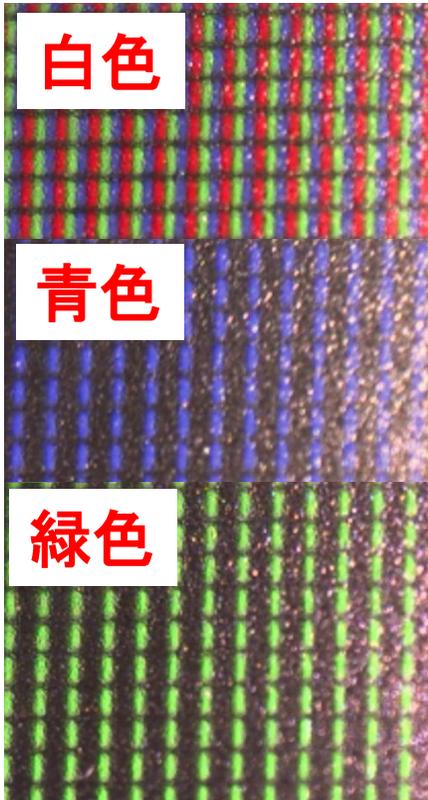
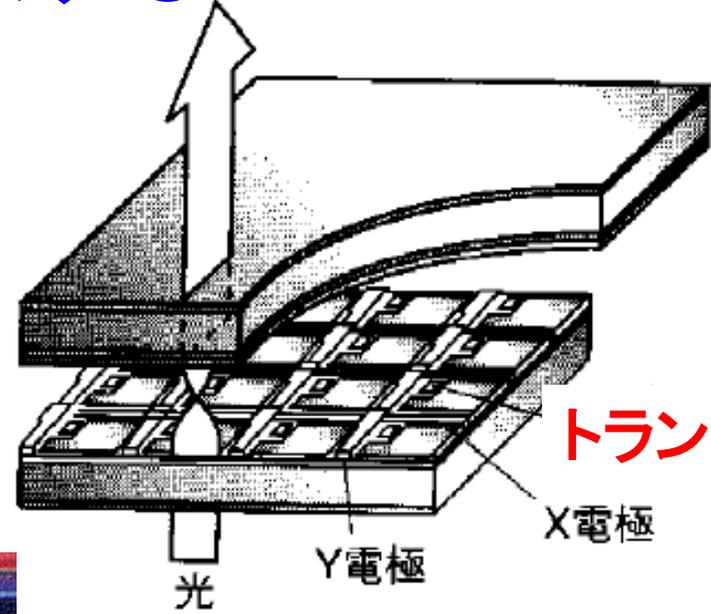
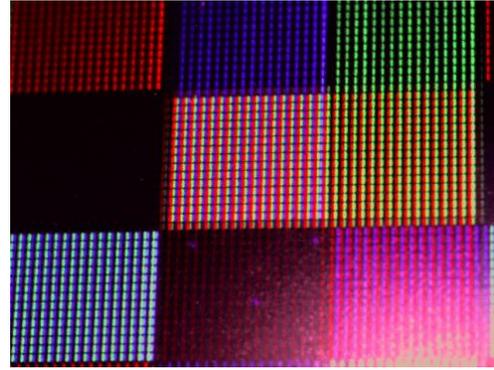
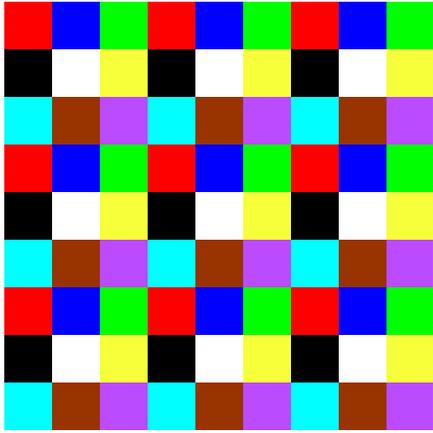
2. 脆い

曲がる酸化物はたくさんある

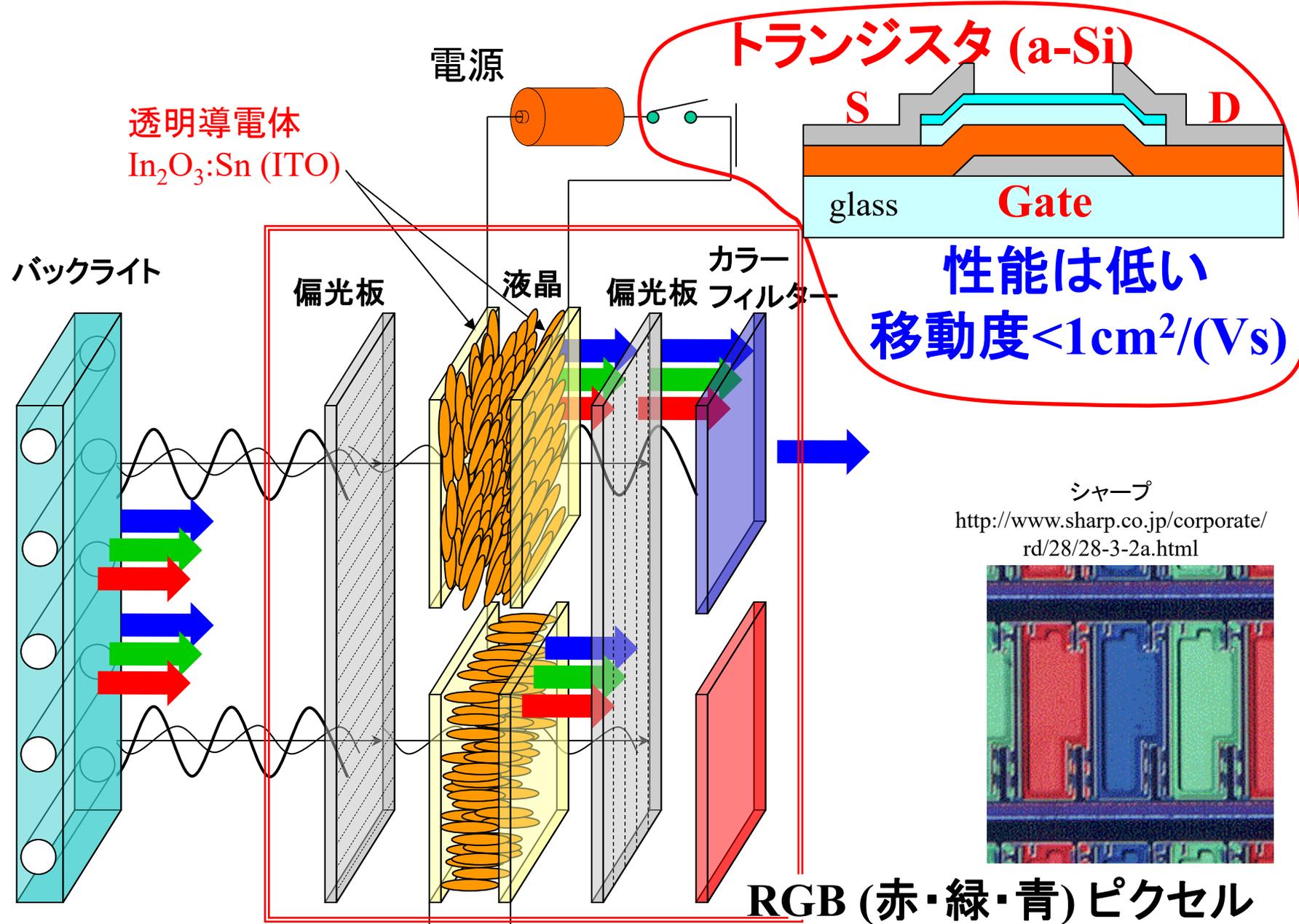
3. 構造材料としてしか使えない

酸化物半導体はSiを超えた

液晶TVを拡大すると...

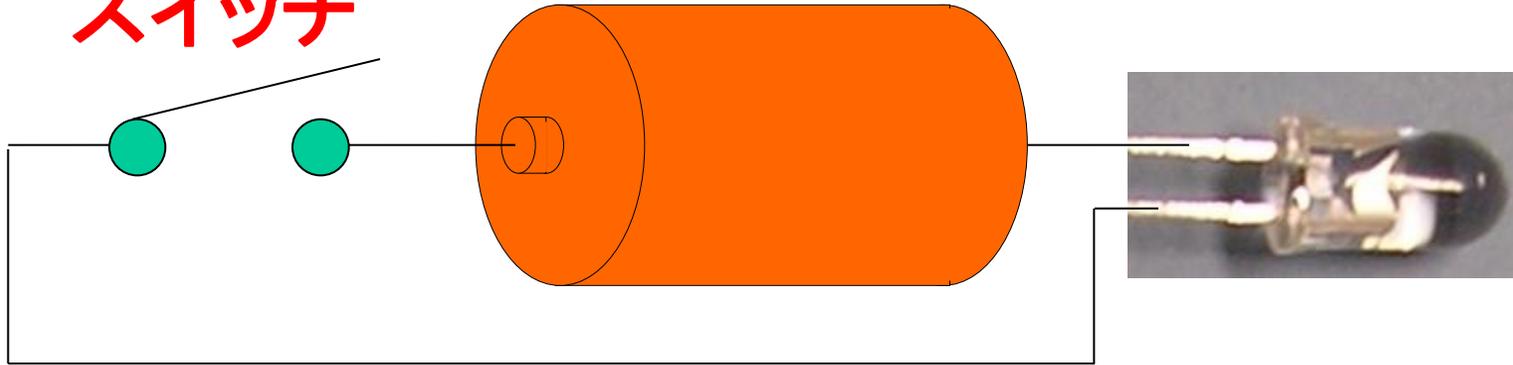


液晶TVの構造

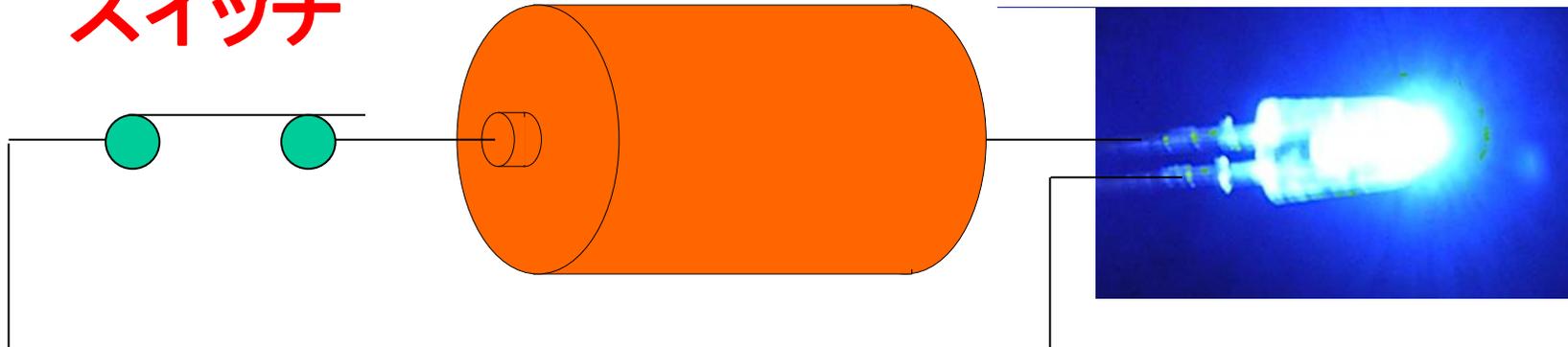


トランジスタ 電気でオン・オフを切り替えるスイッチ

スイッチ



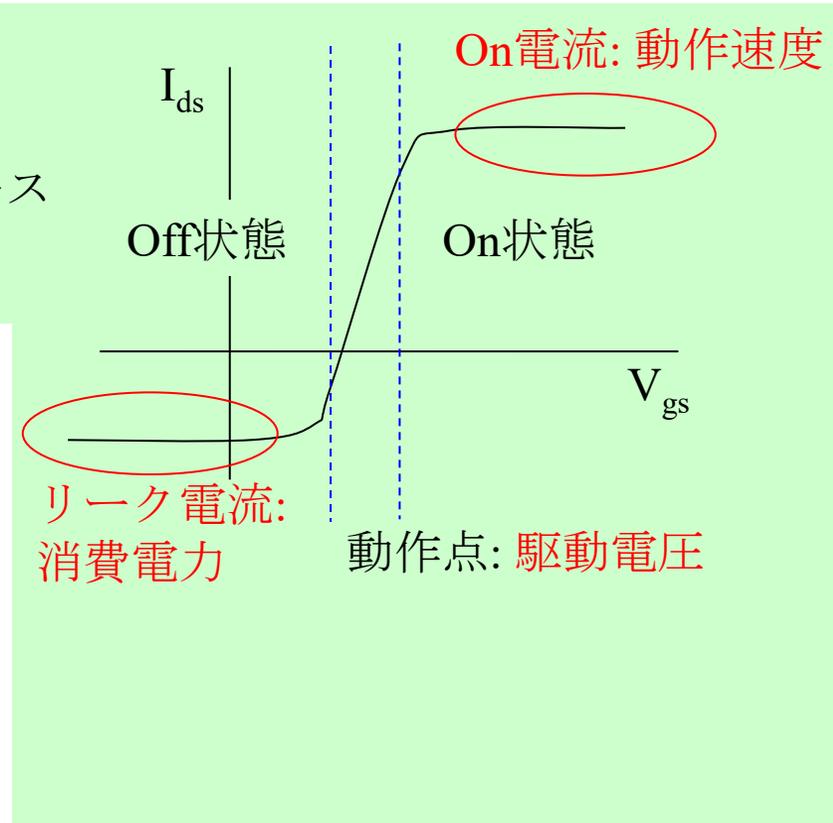
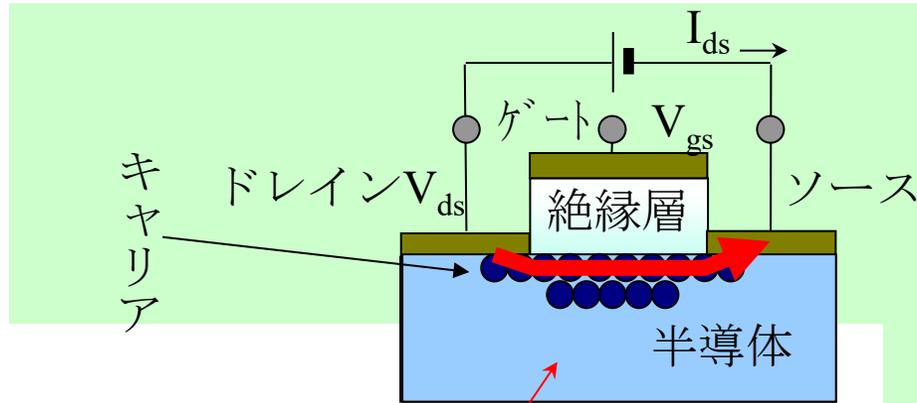
スイッチ



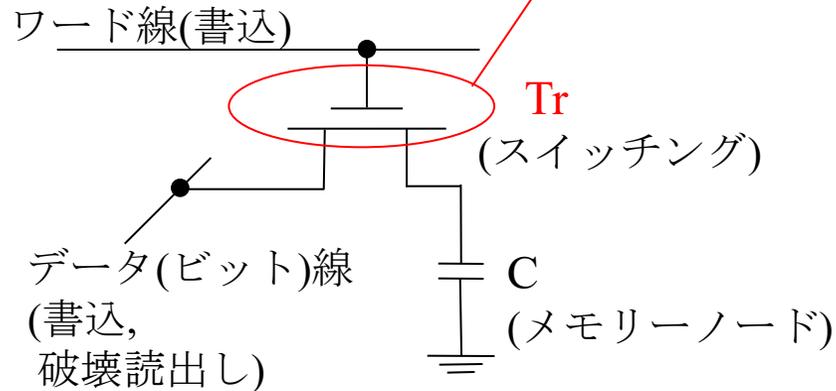
電界効果トランジスタ(FET)の基本動作

トランジスタの基本機能

1. 増幅機能 ゲート電圧に電流が比例する領域を利用
2. **スイッチ機能** ゲート電圧による大きな電流の変調を利用

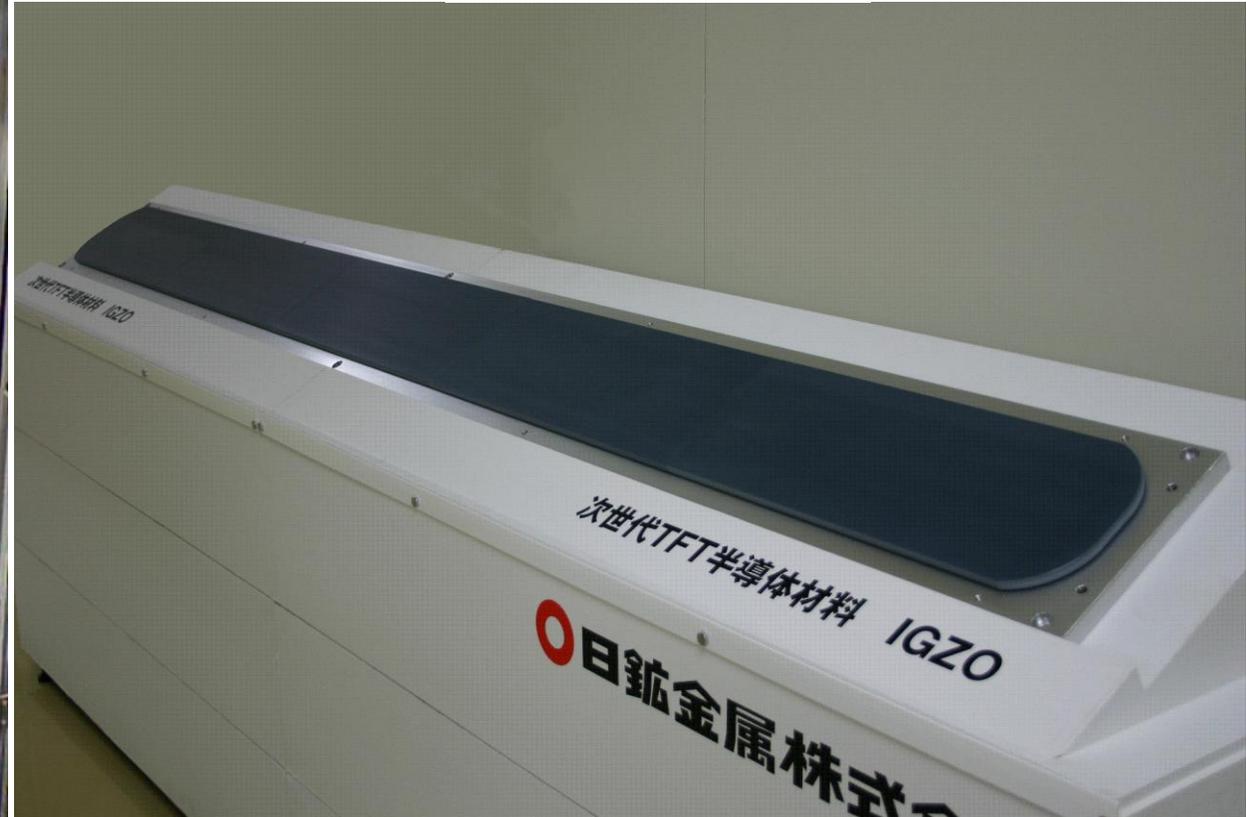


1Tr1C DRAM



液晶TVは2 m 以上のガラスに作る アルバック

日鉱金属



第8世代 (2.1×2.40 m²)

液晶TV用ガラスサイズはどんどん大きくなる

G11 3.00×3.32 m²

G10 2.88×3.13

G8.5 2.20×2.50

G8 2.16×2.46

G7.5 1.95×2.25

G7 1.87×2.2

G6 1.50×1.85

G5 1.10×1.30

G4 0.73×0.92

G3.5 0.68×0.88

G3 0.55×0.65

G2 0.37×0.47

G1 0.30×0.40



なぜ大型ガラス基板を使う？

第10世代 ガラス基板 2.88 m × 3.13 m

| | |
|-------------------------------|--|
| <p>72型 156 cm × 96 cm</p> | |
| | |
| | |

第3世代: 550×650

12.1型6面取り

第5世代: 1000 × 1200

40型2面取り

第6世代: 1500 × 1800

40型3面取り

テレビに使用開始したころ

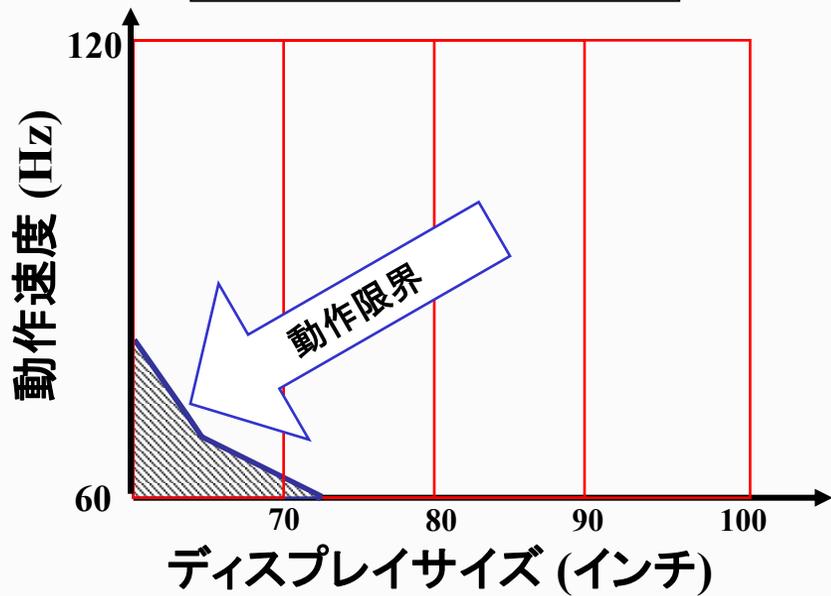
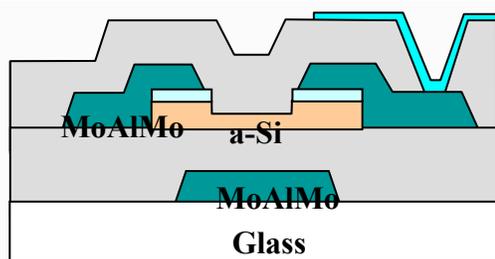
第7世代: 1870 × 2200

40型6面取り

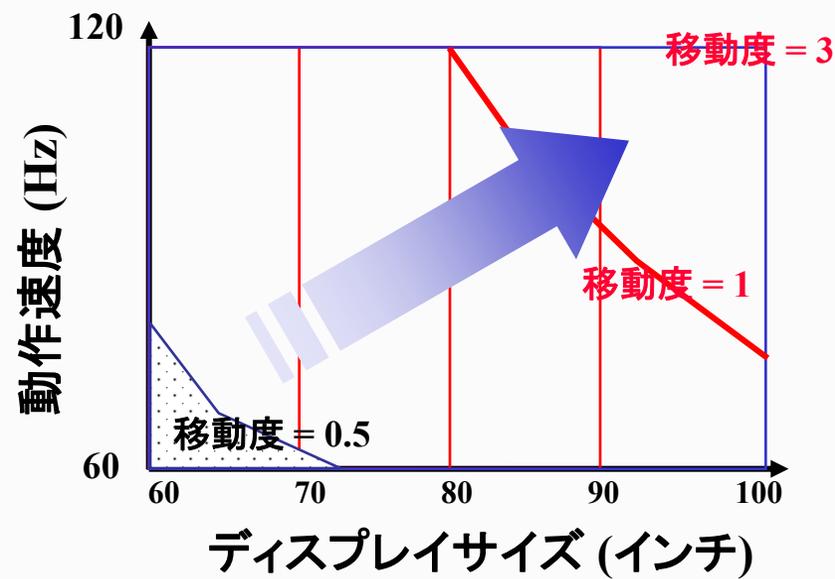
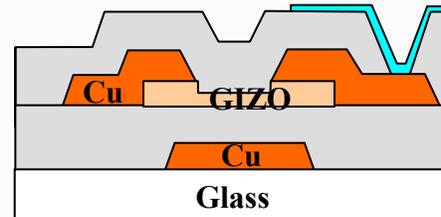
液晶TVが大型化するとシリコンは使えない

出典: Jang Yeon Kwon (SAIT), IDW 2007

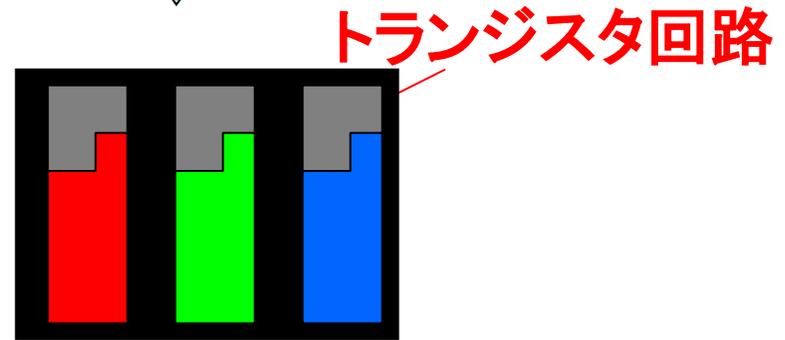
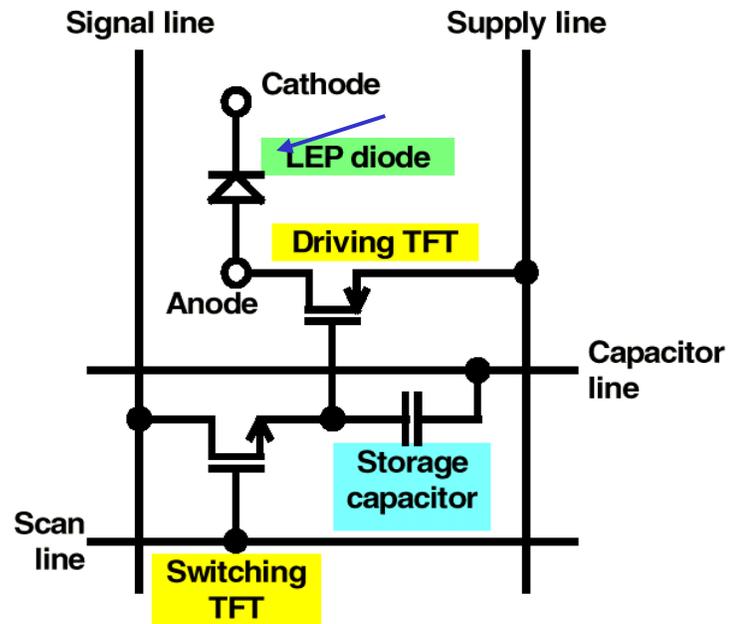
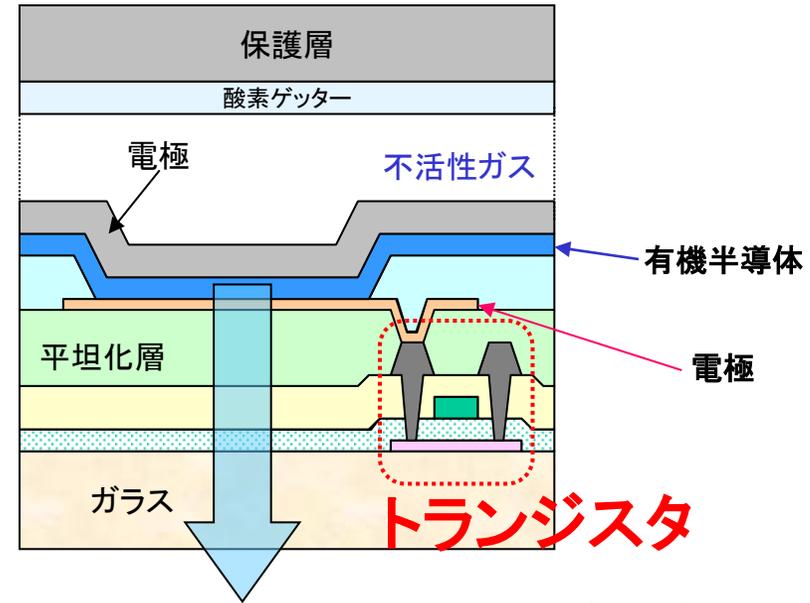
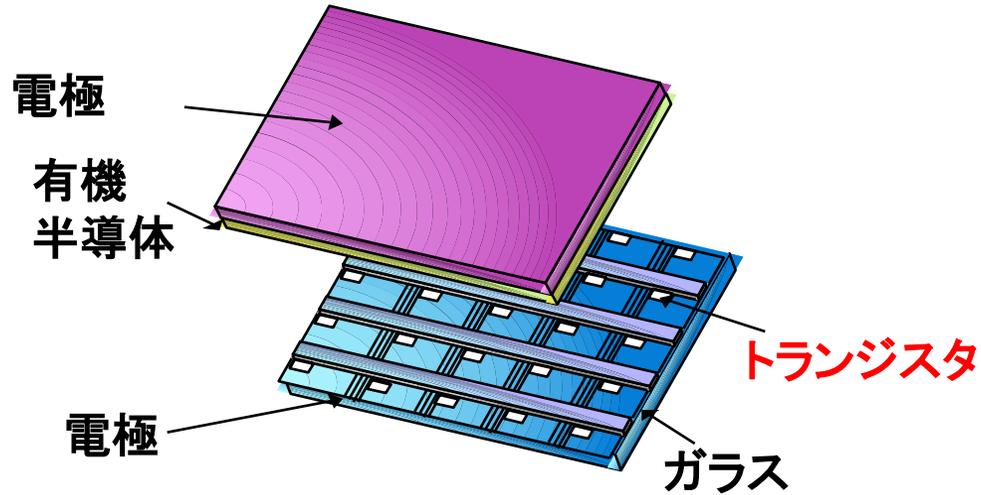
現在の a-Si トランジスタ



高性能トランジスタ



有機ELの駆動方法



先端ディスプレイの トランジスタに必要な特性

- 多くの電流を流せる:
 - 有機ELなら数 μA (**移動度 $> 3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$**)
- 2 m 以上のガラス基板上に作れる
 - 温度は 300°C 以下**
- 同じ特性のデバイスを作れる
- 長い間使っても特性が変わらない
 - 電圧変化で $\ll 1 \text{ V}$ 、実際は $< 0.1 \text{ V}$

できれば

- 曲げても壊れない
- プラスチック上に作れる

アモルファスのほうがいいこともある

単結晶Si太陽電池: < 30cm



<http://www.alibaba.com/pdetail-free/5053167.htm>

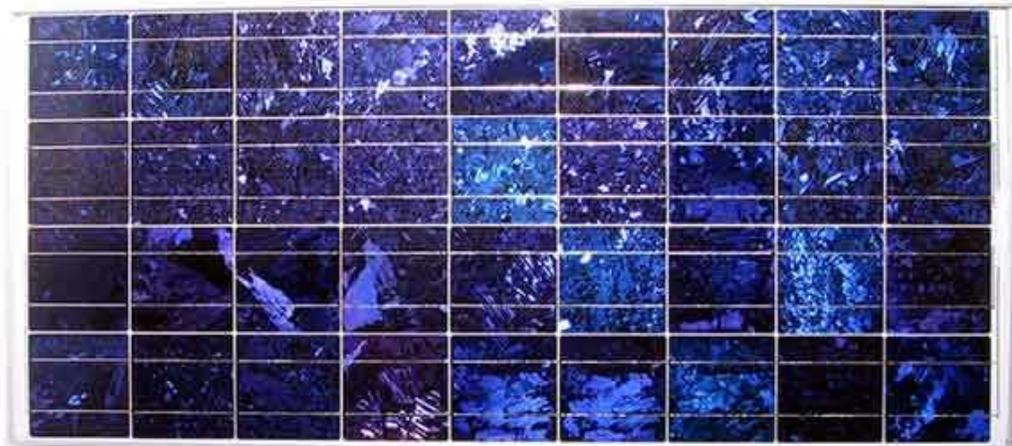


<http://www.gintechenergy.com/jp/index.php/products/douro-series/douro-monocrystalline-silicon-solar-cell>



http://semicon.jeita.or.jp/exposition/topics_03.html

多結晶Si太陽電池



<http://plaza.rakuten.co.jp/breadvan/2005>



http://www.kyocera.co.jp/inamori/library/2_11.html

アモルファスSi太陽電池
>1 m²

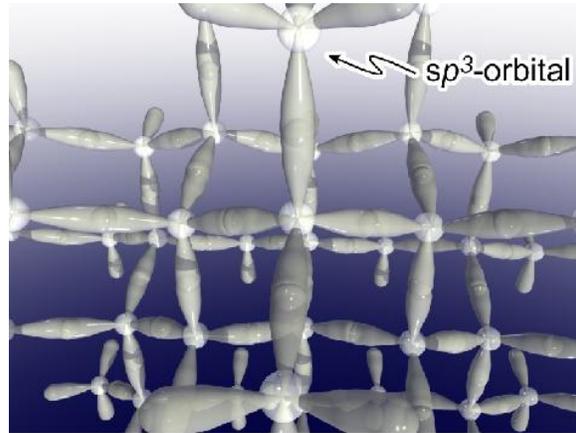


INC-SOLAR AG

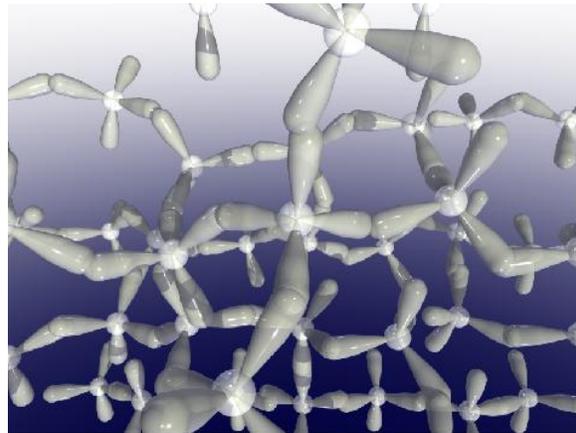
出典:「(株)カネカのアモルファスシリコン太陽電池」海外カタログ

電子輸送路とキャリア輸送特性

シリコン



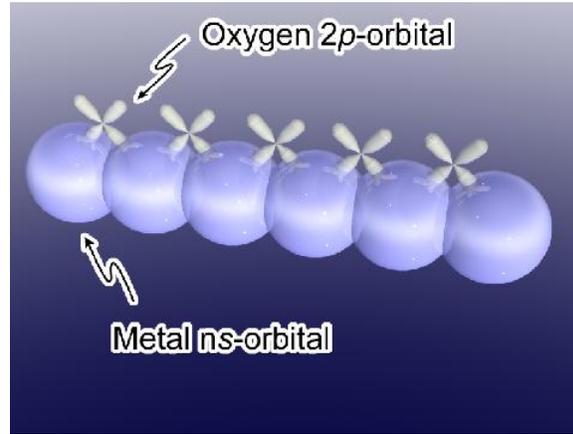
指向性 sp^3 軌道
局在裾状態



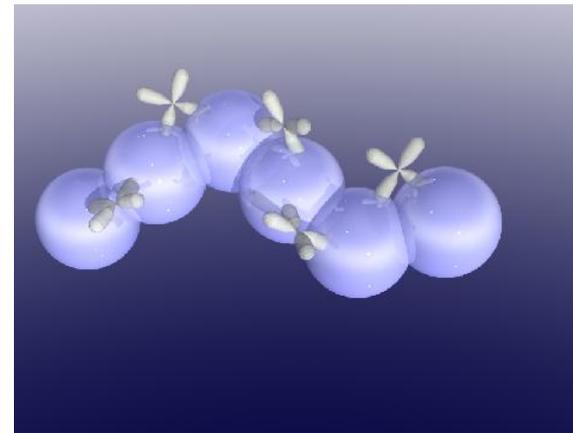
電子移動度
輸送機構
Hall電圧

$\sim 1 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$
ホッピング伝導
符号異常

酸化物



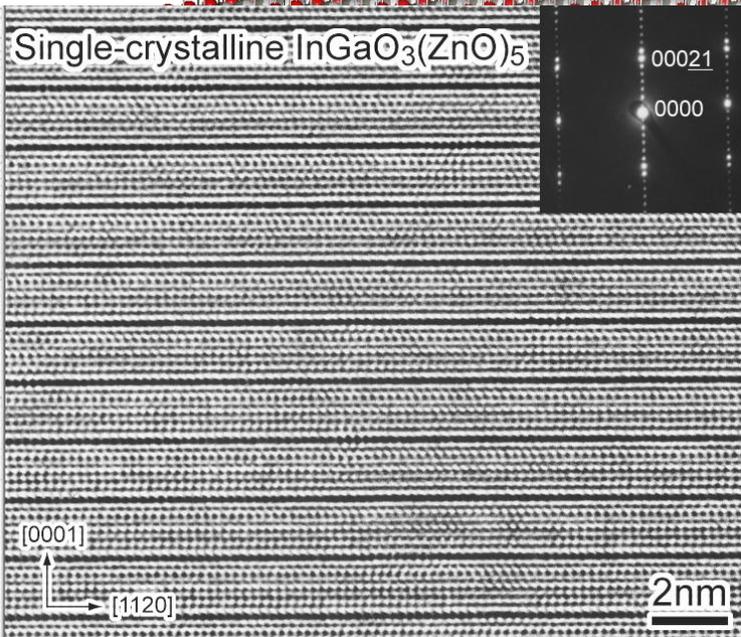
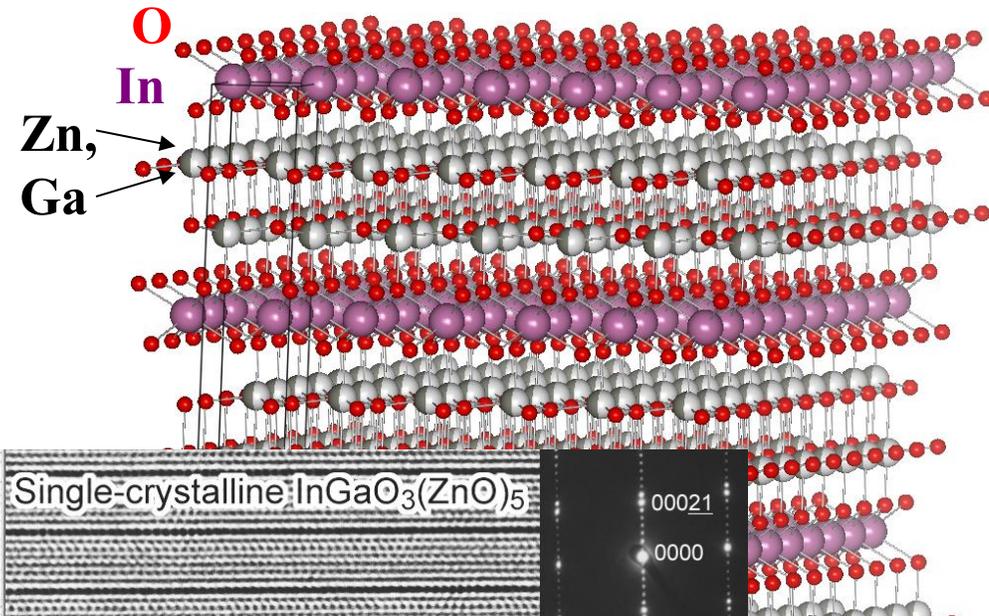
等方的s軌道
大きな影響を
受けない



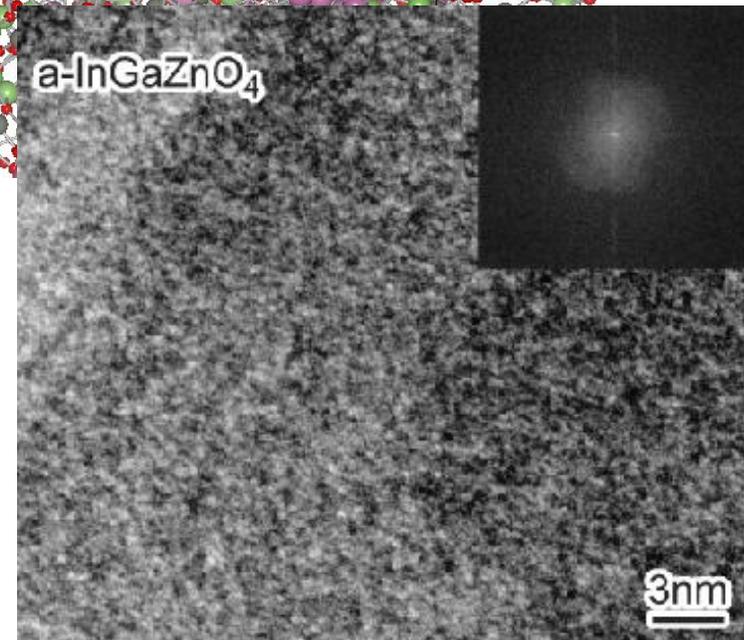
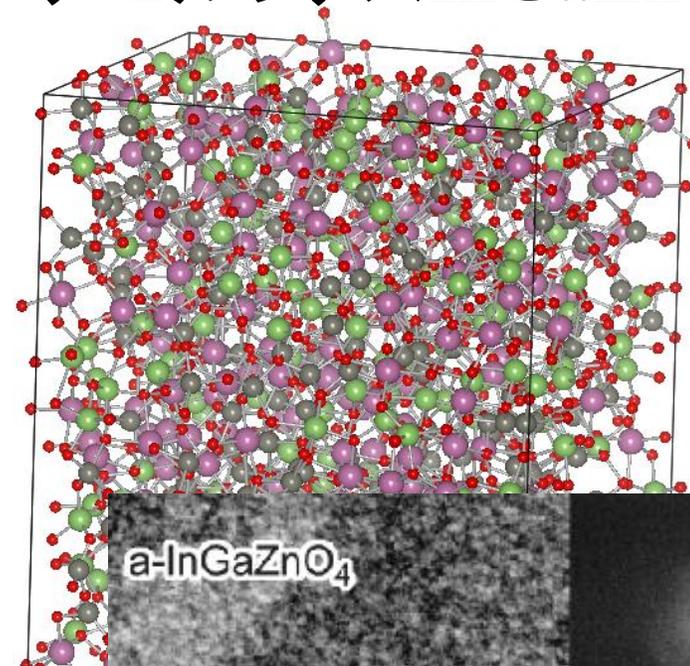
$> 20 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$
縮退伝導 ($> 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
符号異常なし

結晶とアモルファスInGaZnO₄

結晶 InGaZnO₄



アモルファスInGaZnO₄



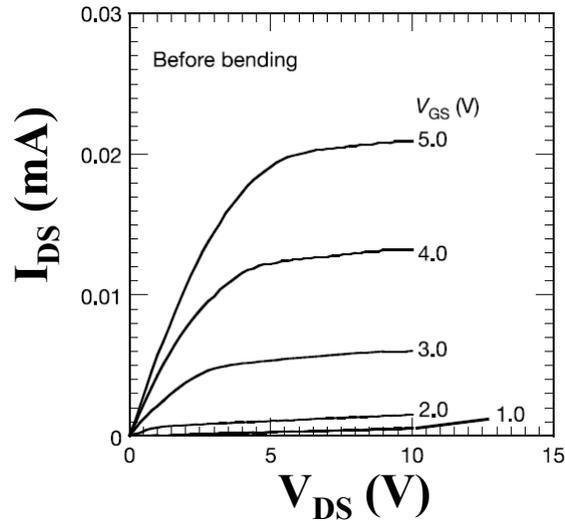
アモルファス酸化物半導体

K. Nomura et al., Nature **432**, 488 (2004)

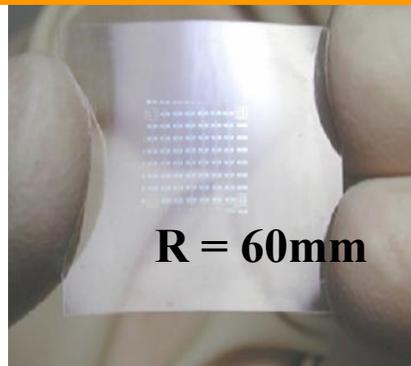
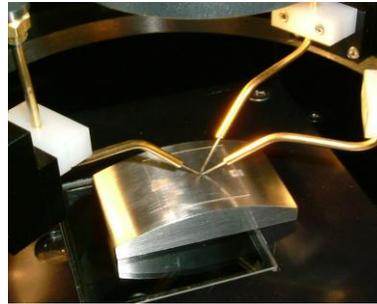
a-InGaZnO₄ (a-IGZO)

- ✓ 室温プロセス可 => フレキブル
- ✓ 高移動度 > 10 cm²/Vs
- ✓ 大きいバンドギャップ $E_g \sim 3.0$ eV => 透明
- ✓ 高い均質性、良好な安定性

2004 曲げる前

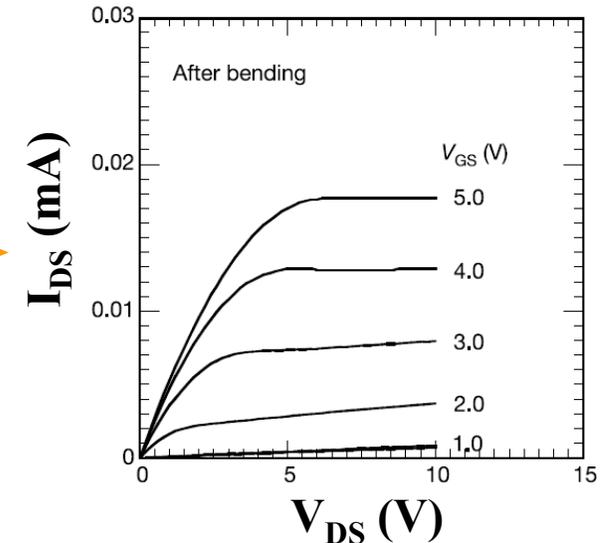


8.3 cm²/Vs



R = 60mm

曲げた後



7 cm²/Vs

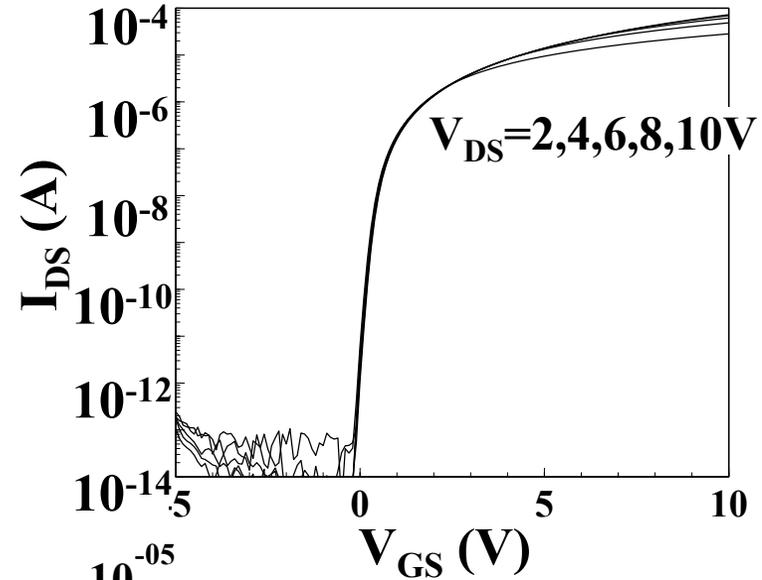
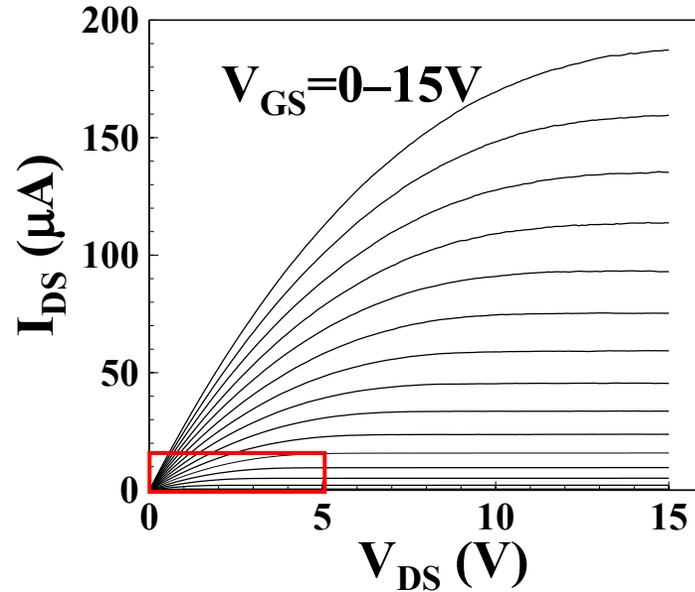
酸化物トランジスタは100倍の電流を流せる

Kamiya et al., Sci. Technol. Adv. Mater. (2010) in print

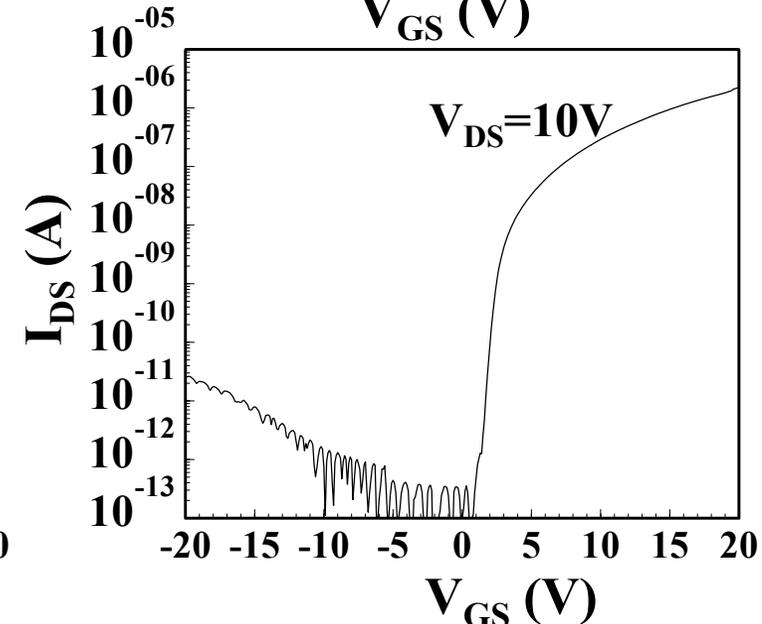
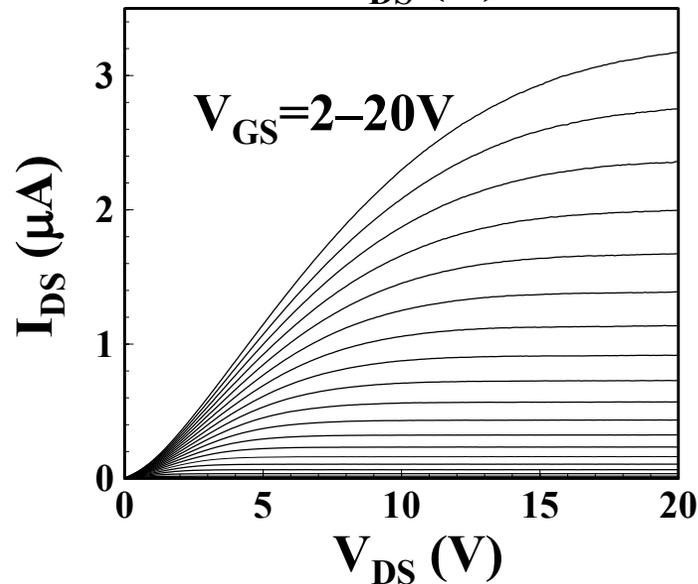
a-IGZO: Top-contact, bottom gate 40nm-thick a-IGZO / 150nm-thick SiO₂ / c-Si, W/L = 300/50 (μm)

a-Si:H : Inverted staggered 200nm-thick a-Si:H / 200nm-thick SiN_x, W/L = 28/6 (μm)

a-IGZO



a-Si:H



シャープ AQUOS Phone Zeta SH-02E

IGZO



InGaZnO₄
2000 材料発見
2004 トランジスタ
動作

市販されているIGZO TFT製品

Apple iPad Pro
12.9", 2,732×2,048
(Sharp, LG etc, 2015/11)



Microsoft Surface Pro 4
12.3", 2,736×1,824
(Samsung, 2015/10)



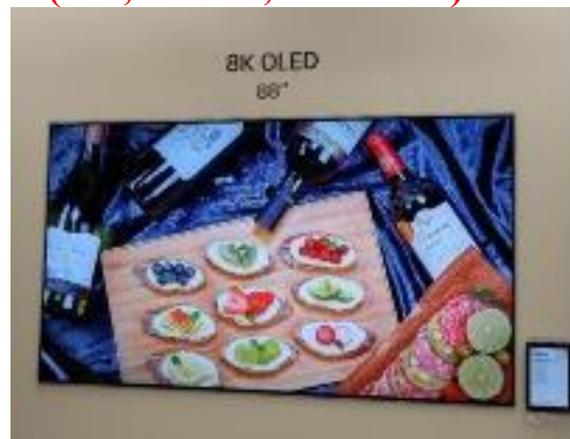
AQUOS EVER SH-02J
5.0", 720×1,280 LCD Full In-Cell
(Sharp, 2016/11/4)



Wallpaper TV (OLED)
65" 4K
(LG, 2017/4, in Japan)



OLED TV
88" 8K
(LG, 2018/1, CES2018)

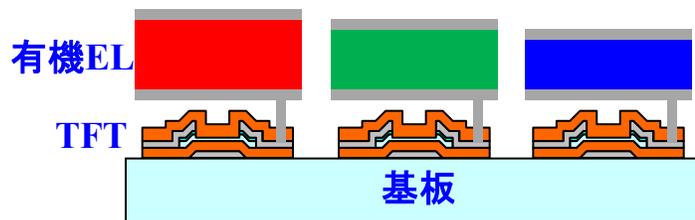


Rollable TV (OLED)
OLED R, 65" 4K
(LG, 2021 on sale at \$100,000)



大型有機EL TVを動かせるのは酸化物だけ

小型 (5 ~ 10") サムスン, LG



LTPS TFT : 大面積化困難 (G6)

RGB OLED: 作製 難しい

効率、輝度 : 良

色域 : 良

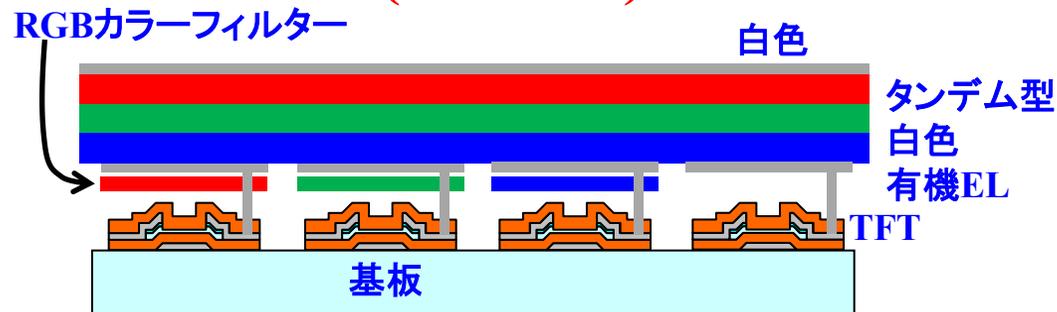
GALAXY Note Edge



LG G Watch R



大型 (55 ~ 77") LG



IGZO TFT : 大面積化OK (G8 1,200×2,200mm²)

WOLED : 作製容易 (G8を2分割)

効率、輝度 : 悪

色域 : 良



超大型有機ELディスプレイ

仁川空港

55型有機EL×(10×14), 8×13 m²



Nソウルタワープラザ (南山、ソウル)

9 m 有機ELトンネル



15 m パノラマ有機EL



LG 3Dワールド



波型有機EL天井 24 m

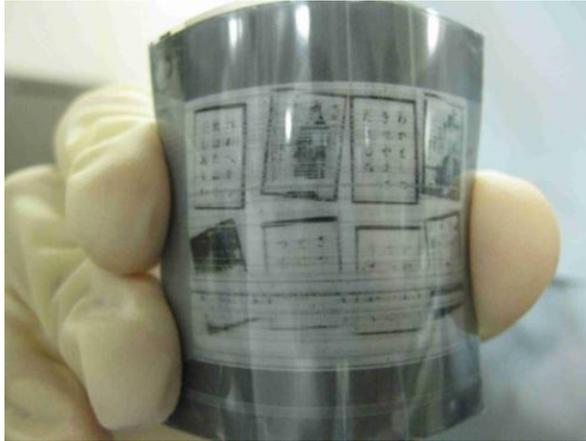


大日本印刷
五反田ビル
ショールーム

55型有機EL×(6×4),
5×4.2 m²

酸化物TFTを使ったフレキシブルデバイス

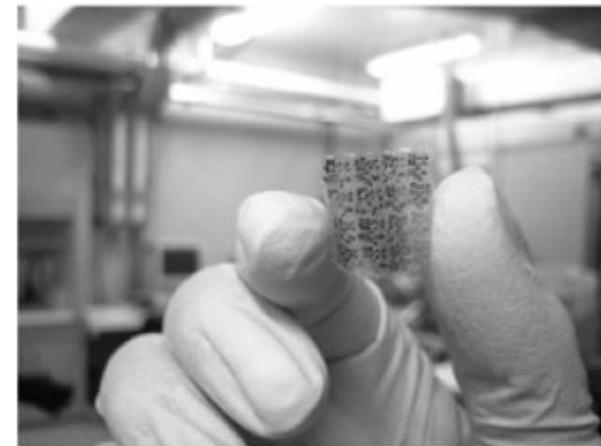
Flexible BW E-paper
2", 80×60, 50ppi (2005)
2", VGA, 400ppi (2009) (Toppan)



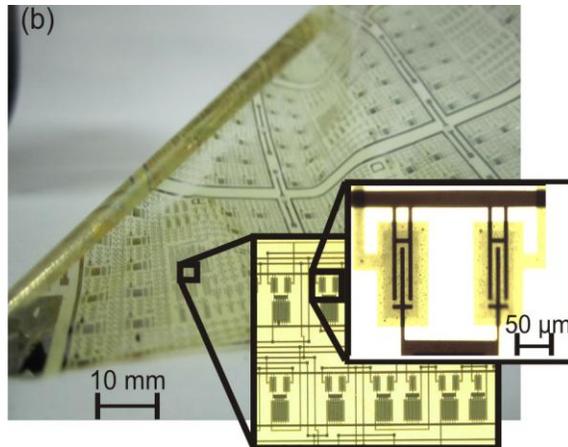
Flexible OLED
6.5", 160×272 (WQVGA, 85ppi)
(SMD, SID2010/APL2009)



Flexible integrated circuit
310 kHz (5-stage RO)
(Taiwan Natl Univ, SID2008)



Solution & Flexible
 $T_{max} = 250^{\circ}C$, $\mu = 2.17 \text{ cm}^2/Vs$
(IMEC, IDW11)



Tri-foldable OLED
Transfer technology, WOLED+CF
(SEL, SID2014)



Kawara-type combined OLED
SEL/AFD (SID2015)
81" 8K (13.5" × 36)



LG's Bringing Its Rollable OLED TV to the US With a \$100,000 Price Tag

2021/7/16 PC mag

<https://www.pcmag.com/news/lgs-bringing-its-rollable-oled-tv-to-the-us-with-a-100000-price-tag>

LG Signature OLED R

65", 120Hz 4K gaming, variable refresh rate

\$87,000 in South Korea in October 2020

\$100,000 in US in 2021



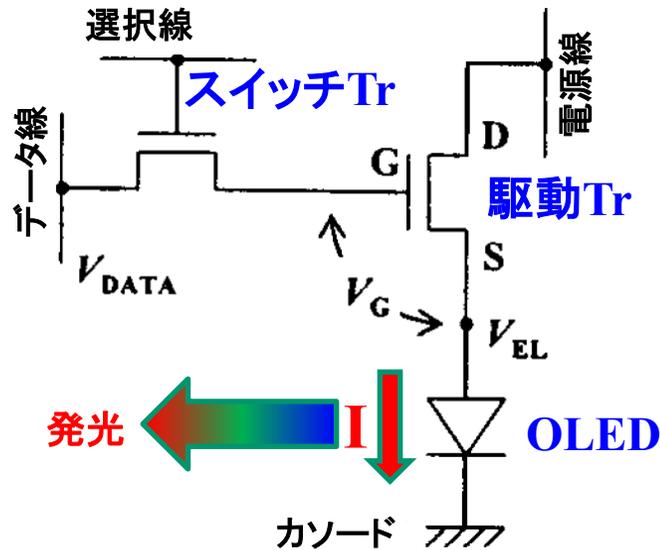
Apple Watch Series 4: LTPO

2018年9月13日発表

<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/01001/>



OLEDの2Tr駆動回路



LTPO:

Low-Temperature Poly-Si and Oxide

スイッチTr:

低オフ電流のAOS TFT

リフレッシュレートを1Hzまで落とせる

駆動Tr:

周辺駆動回路:

大電流を流せるLTPS TFT

酸化物不揮発メモリの集積化へ

高移動度酸化物TFT ($\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) の必要性