

山口大学光・エネルギー研究センターシンポジウム  
～豊かな社会に貢献する光とエネルギー～

# これからの暮らしを支える 光テクノロジー

東京農工大学名誉教授

国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)

佐藤勝昭

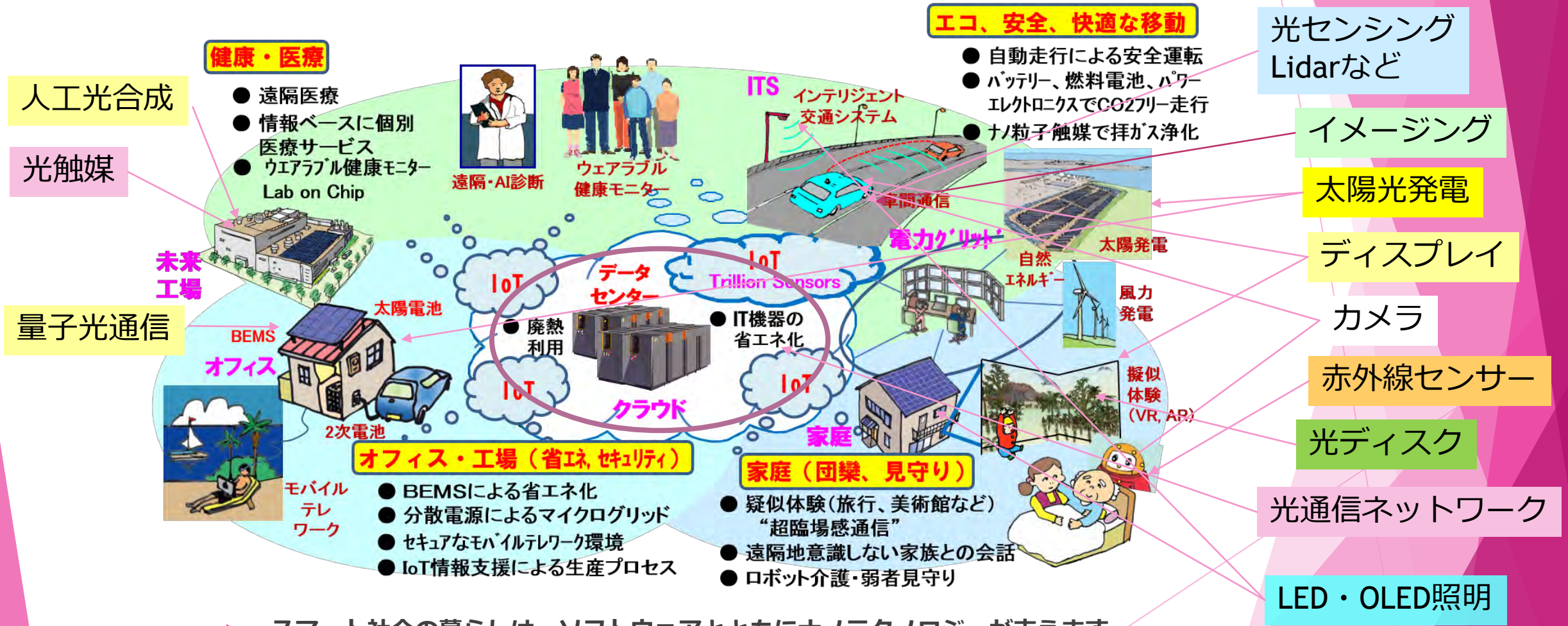
# はじめに

- ▶ 光テクノロジーは、太陽電池、照明、テレビ、PCディスプレイ、光ディスク、光ファイバー通信、ファイバースコープ、ゲノム解析など、様々な形で暮らしと健康を支えています。
- ▶ 光のどのような性質をどのような技術で暮らしや健康に役立っているのかについて概観し、未来社会にむけた研究課題について述べます。

# 第5期科学技術基本計画：スマート社会

- ▶ 第5期科学技術基本計画がスタートしました。
- ▶ 計画ではこれからの社会はSociety 5.0となるとしています。
  - ▶ 狩猟社会→農耕社会→工業社会→情報社会→Society 5.0
- ▶ Society 5.0は、CyberとPhysicalとが融合した社会（スマート社会）です。
- ▶ CyberとPhysicalをつなぐIoT（Internet of Things）、AI（Artificial Intelligence）などは、デバイスとネットワークによって支えられます。
- ▶ その要所要所に、「光」と「エネルギー」が関与します。

# スマート社会を支える ナノテクノロジー・光テクノロジー



- ▶ スマート社会の暮らしは、ソフトウェアとともにナノテクノロジーが支えます
- ▶ その多くが光・エネルギーに関する「光テクノロジー」です。

# 暮らしと光テクノロジー

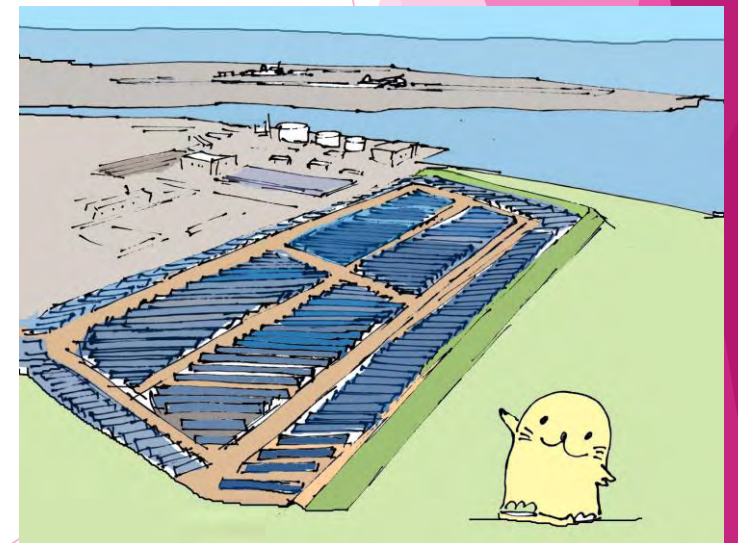
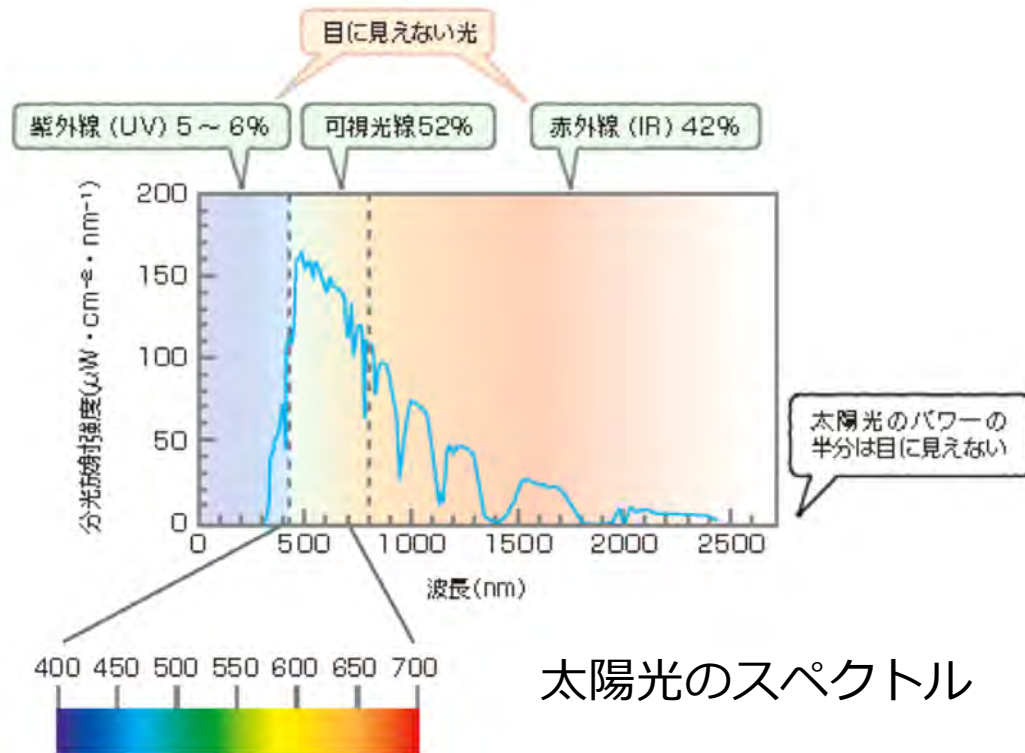
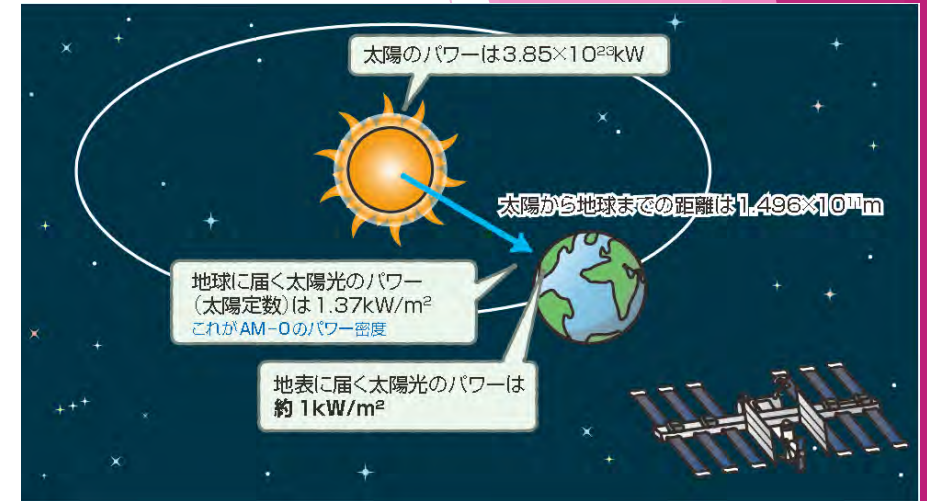
- ▶ 家庭（生活、団らん、見守り）
  - ▶ エネルギー（太陽光・太陽熱）
  - ▶ 照明（LED, 有機EL）
  - ▶ 娯楽（ディスプレイ、光ディスク）
  - ▶ 通信（光ファイバー、スマホ）
  - ▶ ホームワーク（プリンタ、スキャナ）
  - ▶ 見守り（光センサ、カメラ）
  - ▶ 保健/衛生（UV殺菌灯、自動水栓）



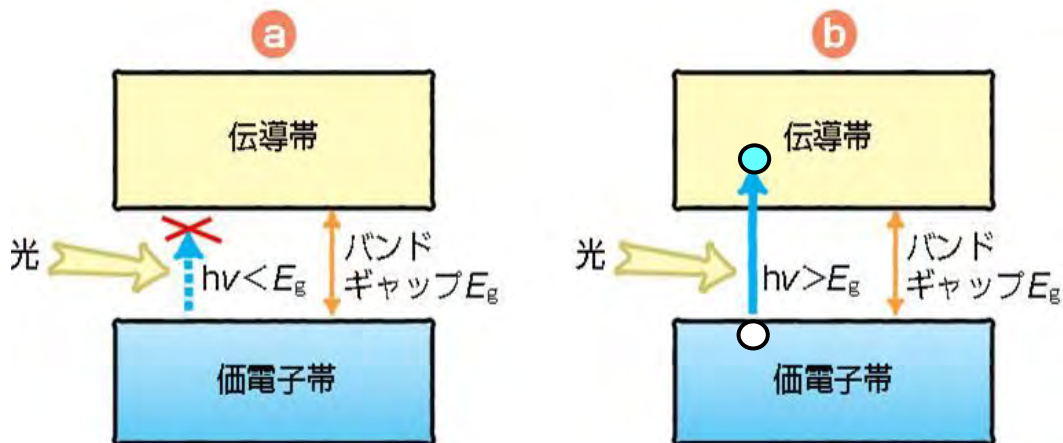
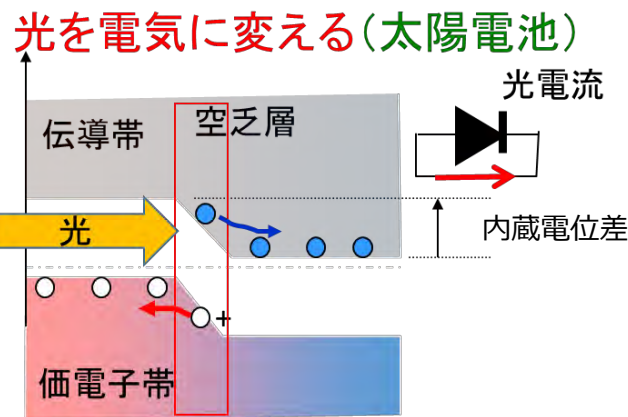
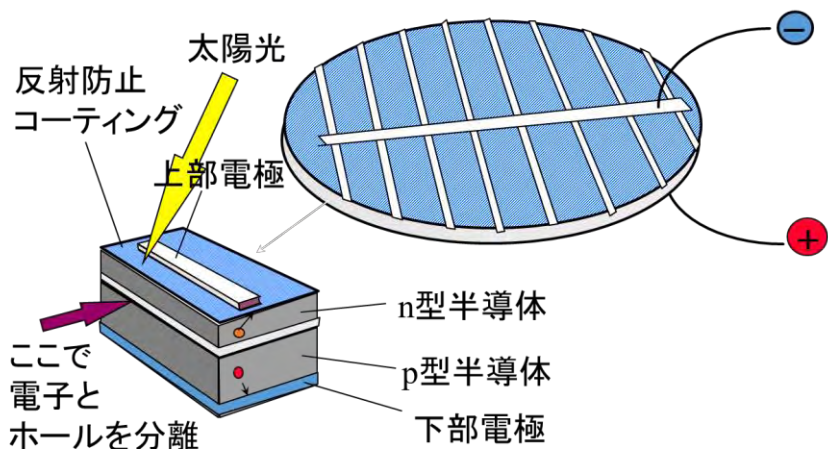
# エネルギーとしての光

# 太陽光エネルギー

- ▶ 太陽光発電・太陽熱利用などでは太陽光のもつエネルギーを利用します。
- ▶ 太陽光のパワー密度（単位時間・単位面積あたりのエネルギー）は地上では約 $1\text{kW}/\text{m}^2$ です。



# 太陽電池の仕組み



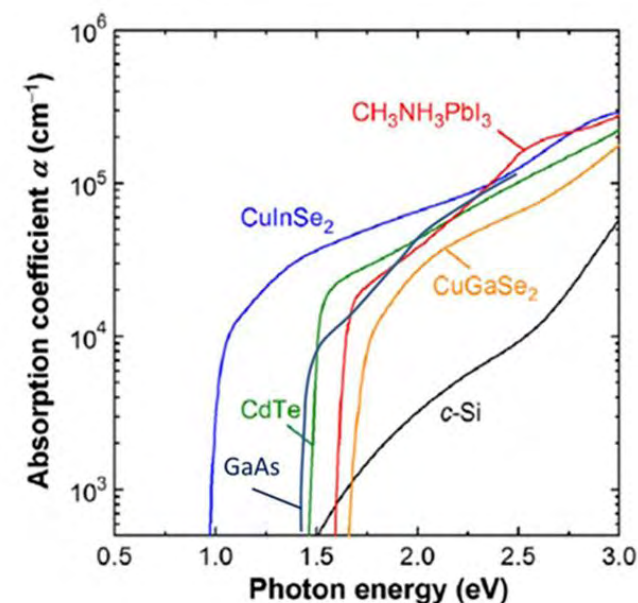
- ▶ 太陽電池は、半導体の仕掛けの一種です。n型半導体（電子が電気伝導を担う）とp型半導体（電子の抜け孔であるホールが電気伝導を担う）の接合（pn接合）を用いています。
- ▶ 半導体中の電子のエネルギーは、電子の詰まった価電子帯と、電子のいない伝導帯に分かれています。価電子帯の頂と伝導帯の底のエネルギーの隙間をバンドギャップといいます。
- ▶ 価電子帯の電子は、バンドギャップより大きな光のエネルギーを受けて、価電子帯から伝導帯に遷移します。その結果、伝導帯に電子、価電子帯にホールが生じます。
- ▶ 生成された電子とホールは、pn接合を作ったときに生じる界面付近の内蔵電位差（電位の坂道）で分離され、p型がプラス、n型がマイナスになります。



# 太陽電池に使われる材料

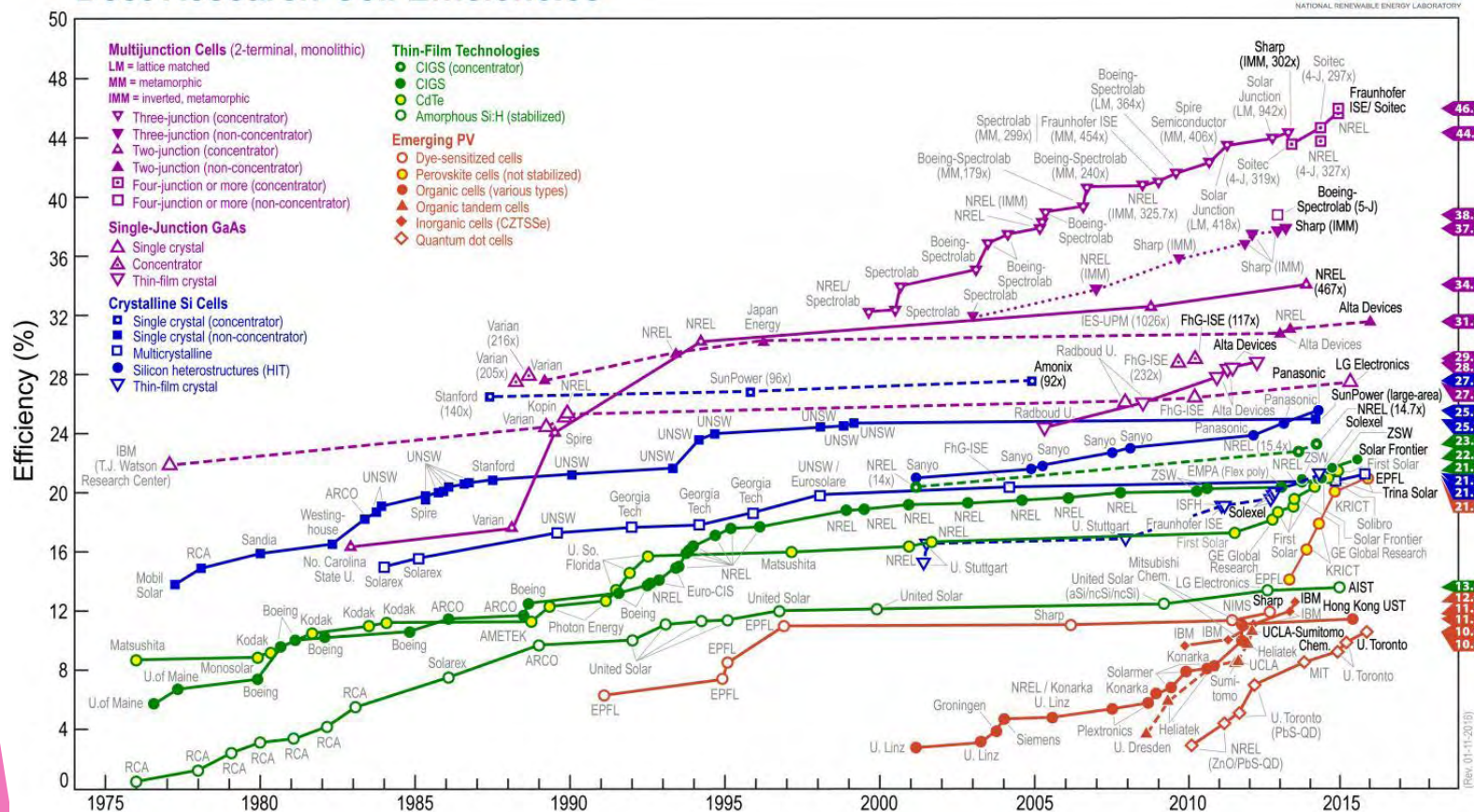
- ▶ 結晶Si（間接遷移型半導体）の吸収係数は光子エネルギーに対して緩やかに増大します。可視域の吸収係数が小さいので入った光を全部吸収するには150 $\mu\text{m}$ もの厚い結晶が必要です。
- ▶ GaAs、CdTe（直接遷移型半導体）では、吸収係数は吸収端直上で急峻に増加。Siより2桁程度大きな吸収係数を持ち厚さ1~2 $\mu\text{m}$ の薄膜でもOKです。
- ▶  $\text{CuInSe}_2$ は現存する半導体の中で最も高い吸収係数を持ちます。
- ▶ 有機無機ハイブリッドペロブスカイト半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ はGaAsと同様の急峻な立ち上がりを持ち、CIGS同等の大きな吸収係数を示します。

半導体	バンドギャップ
セレン化銅インジウム ( $\text{CuInSe}_2$ )	1.04eV
シリコン Si	1.12eV
テルル化カドミウム ( $\text{CdTe}$ )	1.47eV
ガリウムヒ素 ( $\text{GaAs}$ )	1.42eV
3ヨウ化メチルアンモニウム鉛 ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ )	1.5eV
硫化銅インジウム ( $\text{CuInS}_2$ )	1.53eV
セレン化銅ガリウム ( $\text{CuGaSe}_2$ )	1.68eV



# 変換効率の推移

Best Research-Cell Efficiencies



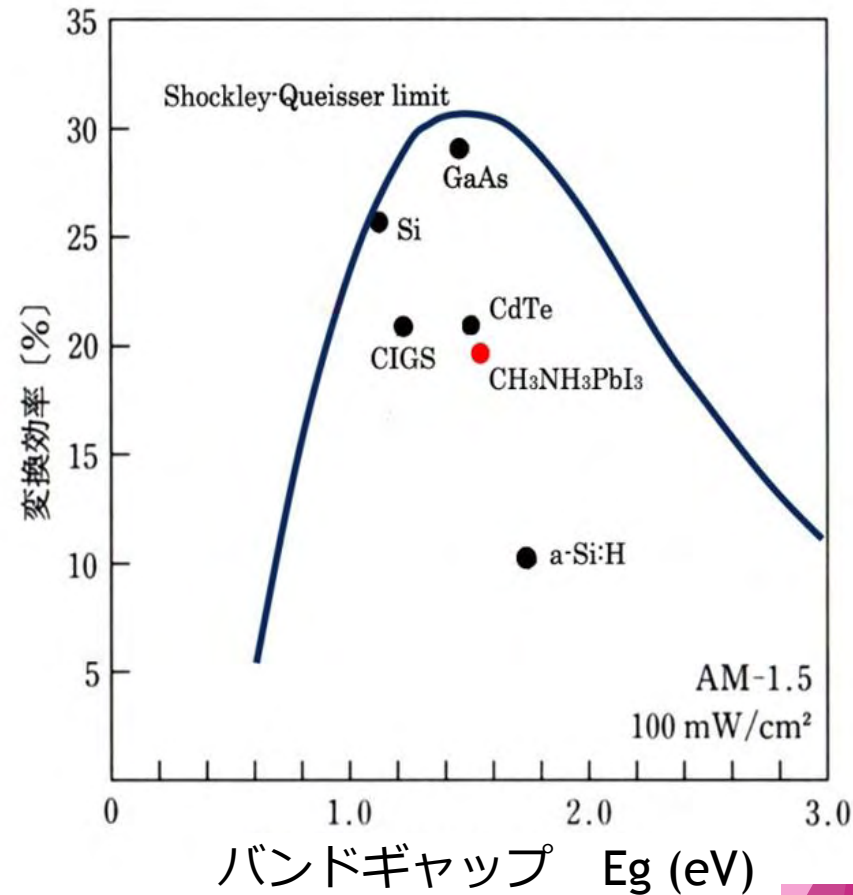
▶ 図は米国のNRELが発表している太陽電池の変換効率の推移です

▶ 長期間にわたる様々な技術開発によって、右肩上がりの変換効率の改善が進んで来ました。

▶ 中でも、最近目を見張る急激な増大を示しているのがペロブスカイト太陽電池です。

# 理論限界効率とさまざまな半導体

- ▶ 図の実線は「理論限界変換効率曲線」と呼ばれ、ShockleyとQueisserが詳細釣合いの法則により理論的に予測した変換効率とバンドギャップの関係を表す曲線です。
- ▶ これによるとバンドギャップが1.4eV付近で最大値約30.5%をとることがわかります。
- ▶ 1.4eV以下では、バンドギャップが小さいので開放端電圧 $V_{oc}$ が低下します。一方1.4eV以上では、スペクトルの利用効率が低下し短絡電流 $I_{sc}$ が低下します。
- ▶ 単結晶Si太陽電池の変換効率は理論限界にほぼ達しており、エピタキシャルGaAs薄膜太陽電池についても理論限界の90%を超える値となっていることがわかります。

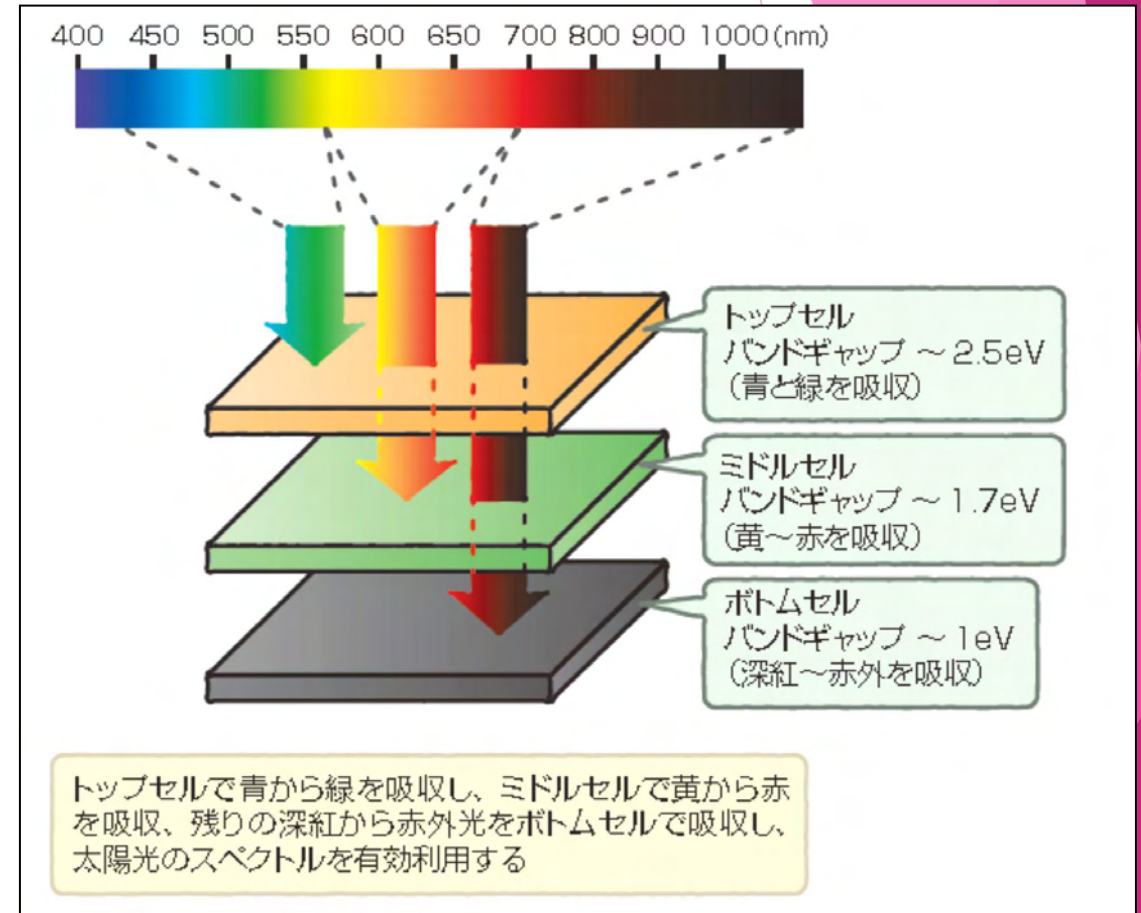


# 太陽電池の課題

- ▶ より高効率をめざす
  - ▶ 太陽光のスペクトルの有効利用→多接合タンデム太陽電池
  - ▶ 太陽光の強度を強める→集光型太陽電池
- ▶ より少ない資源で
  - ▶ 吸収係数の高い材料の利用→シリコンからCIGSやCdTeなどの薄膜へ
- ▶ 希少元素・有毒材料を使わない
  - ▶ クラーク数の高い元素を用いない→カルコパイライト $\text{CuInGaSe}_2$ からケステライト $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ へ
  - ▶ 毒性の高い元素を用いない→カドミウム、鉛などを用いない
- ▶ より低コストのプロセスで
  - ▶ バルク結晶：ウェハー切断・セル作製・モジュール化→薄膜成膜・セル,モジュール形成
  - ▶ プロセスの簡素化→塗布：有機無機ペロブスカイト

# 多接合タンデム太陽電池

- ▶ 図は、3接合型タンデム太陽電池の概念図です。トップセルで青から緑を吸収し、ミドルセルで黄から赤を吸収し、残りの深紅から赤外光をボトムセルで吸収することで、太陽光のスペクトルを有効利用します。
- ▶ しかし、3つのセルを積層しても、3つの太陽電池それぞれの最大出力を合わせた出力を得ることはできません。なぜなら、2番目、3番目のセルには、上のセルで吸収された光が届かないことや、直列につなぐので電圧は足し算になりますが、電流はもっとも短絡電流 $J_{sc}$ の小さなセルで抑えられてしまうということがあるからです。
- ▶ このほか、セルを積層する製造工程の中で、上に載せたセルの結晶性が悪くなり、性能が十分に発揮できないということもあります。



宇宙用に開発されたInGaP/InGaAs/Geの3接合太陽電池では、InGaPトップセルは660nm以下、InGaAsミドルセルは660～890nm、Geボトムセルは890～2000nmの波長領域の光を変換します

# 集光型太陽電池

- ▶ 宇宙用に開発された複雑な構造のセルは、効率が高くて高コストなので、大面積の太陽電池モジュールとしては用いられません。しかし、安価なレンズや鏡で集光すれば小面積のセルでも十分な電力をつくれるので、宇宙用のセルを地上用に転用することができます。
- ▶ 集光した場合には、単位面積あたりの短絡電流は集光比に比例して増大し、開放電圧は集光比の対数に比例してゆっくり増大します。さらに、曲線因子も多少増大することがわかっています。この結果、集光比とともに変換効率が改善されるのです。

図1 フレネルレンズ集光型太陽電池の構成図

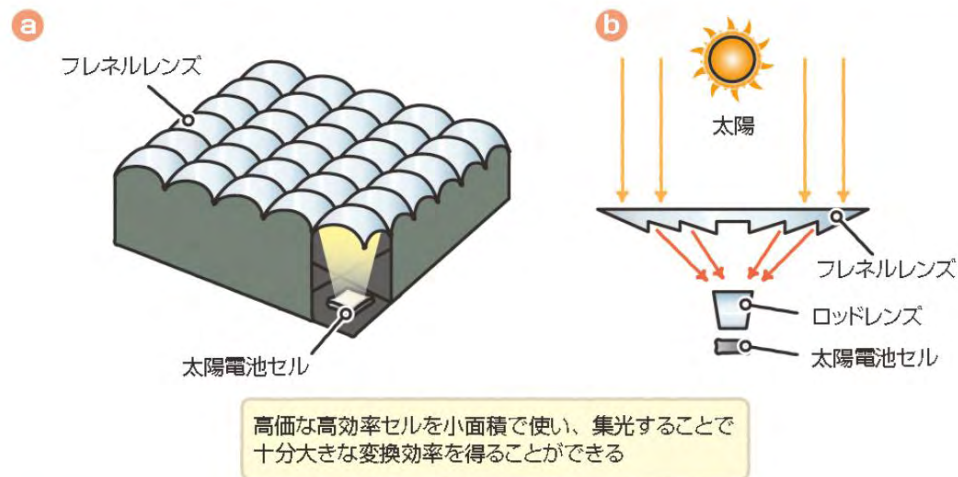
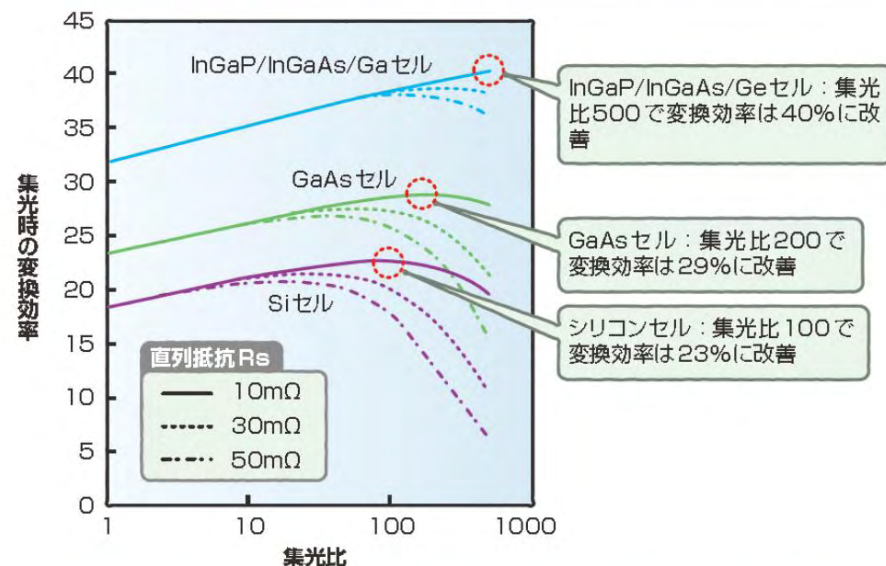


図2 集光比を上げると変換効率は非集光の場合より向上する



集光比を上げると、変換効率ははじめは増加するが、ある集光比で最大値をとったあとは減少する。直列抵抗が低いほど変換効率の最大値は大きくなる

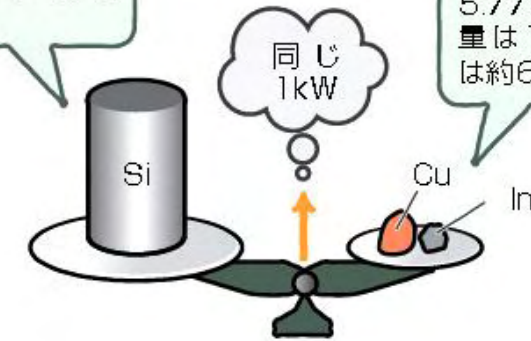
# より少ない資源で

同じ1kW発電するのにシリコンは5kg必要だが、CISなら銅+インジウム60gでOK

シリコンの太陽電池では、約200 $\mu$ mの厚さのシリコン結晶が必要なので、1kWの出力を得るには**シリコンが約5kg必要**です

CIGS薄膜では2 $\mu$ mの薄さで十分なので、同じ1kWを発電するのに**金属原料の総重量は60g**でよく、はるかに省資源です。

効率が10%として、1kWの電力を得るには10m<sup>2</sup>の面積が必要。シリコンの厚みを200 $\mu$ mとすると、体積は2000cm<sup>3</sup>となり、シリコンの密度は2.34であるので、必要なシリコンの重量は約5kg



効率が10%として、1kWの電力を得るには10m<sup>2</sup>の面積が必要。CISの厚みを2 $\mu$ mとすると、体積は20cm<sup>3</sup>となる。CISの密度は5.77であるので、必要なCISの重量は115g、金属(Cu+In)の重量は約60g

CIS (CuInSe<sub>2</sub>) は直接遷移型半導体なので、光吸収係数はほかの半導体と比べて非常に大きく、このため、たった1~2 $\mu$ mという薄さの膜でも太陽光を強く吸収します。インジウム (In) の一部をガリウム (Ga) で置換したCIGSは、バンドギャップを1.25eV付近にもち、変換効率が高く、小面積セルでは22.6%という高い効率が報告されています\*。大面積のモジュールにしても、シリコン多結晶太陽電池の変換効率と遜色ない17.9%の効率ができます\*\*。

\*<https://www.pv-tech.org/news/zsw-achieves-world-record-cigs-lab-cell-efficiency-of-22.6>

\*\*<http://solarindustrymag.com/avancis-claims-efficiency-record-for-cigs-solar-module>

# 希少元素を用いない

- ▶ 表1に、クラーク数を30位まで掲げます。おおまかには、酸素 (O) が50%、シリコン (Si) が25%を占めています。
- ▶ クラーク数から見るかぎり、次世代においてもシリコンが最重要な太陽電池材料であり続けることは間違いないでしょう。
- ▶ 太陽電池材料として研究されているガリウムヒ素 (GaAs)、テルル化カドミウム (CdTe) も30位以内にありません。
- ▶ CIGS ( $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ) についても、かろうじて銅 (Cu) が25位に入っているだけなので、インジウム (In) に代えてスズ (Sn、30位) と亜鉛 (Zn、31位) を使う $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ という4元化合物に置き換える研究が行われています。

表1 クラーク数

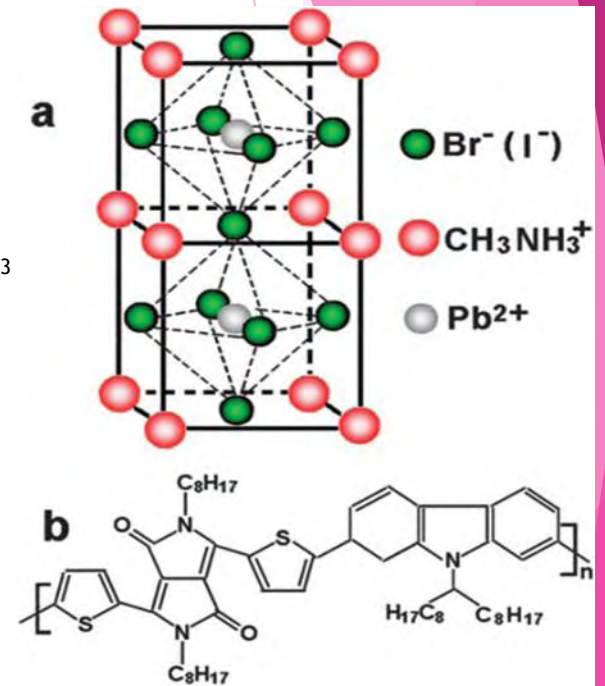
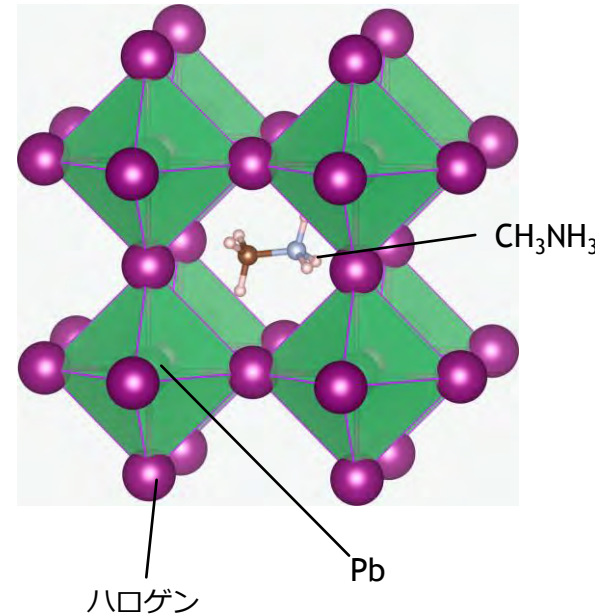
順位	元素	クラーク数	順位	元素	クラーク数	順位	元素	クラーク数
1	酸素(O)	49.5	11	塩素(Cl)	0.19	21	クロム(Cr)	0.02
2	ケイ素(Si)	25.8	12	マンガン(Mn)	0.09	22	ストロンチウム(Sr)	0.02
3	アルミニウム(Al)	7.56	13	リン(P)	0.08	23	バナジウム(V)	0.015
4	鉄(Fe)	4.70	14	炭素(C)	0.08	24	ニッケル(Ni)	0.01
5	カルシウム(Ca)	3.39	15	硫黄(S)	0.06	25	銅(Cu)	0.01
6	ナトリウム(Na)	2.63	16	窒素(N)	0.03	26	タングステン(W)	0.006
7	カリウム(K)	2.40	17	フッ素(F)	0.03	27	リチウム(Li)	0.006
8	マグネシウム(Mg)	1.93	18	ルビジウム(Pb)	0.03	28	セリウム(Ce)	0.0045
9	水素(H)	0.87	19	バリウム(Ba)	0.023	29	コバルト(Co)	0.004
10	チタン(Ti)	0.48	20	ジルコニウム(Zr)	0.02	30	スズ(Sn)	0.004

アメリカの地質学者クラークが算出した地球上の地殻表層部(地表部から海面下約16kmまでの岩石圏93.06%、水圏6.91%、気圏0.03%)に存在する元素の割合を質量パーセントで表した指数。この地殻表層部の質量は地球全質量の約0.7%にあたる



# 低コストプロセス：塗って作る太陽電池

- ▶ 2009年に宮坂らは、有機-無機ハイブリッド半導体であるハロゲン化金属ペロブスカイトの $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ を色素の代わりに使い色素増感太陽電池(DSS)で3.8%の変換効率を実現しました。
- ▶ 2012年、Grätzel, Parkらは溶液を固体化することにより、DSSとしては最高効率の9.7%の変換効率を得ました。
- ▶ 2016年でのCertified Efficiencyの世界記録は、22.1%です。
- ▶ Pbを使っていること、低安定性が欠点で、Sn, Biなどに替えた場合は高い効率はでていません。



バンド図から、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は直接遷移型の普通の半導体であることが読み取れます。有機分子は、構造を安定化する働きをしていると考えられていますが、詳細な働きはわかりません。

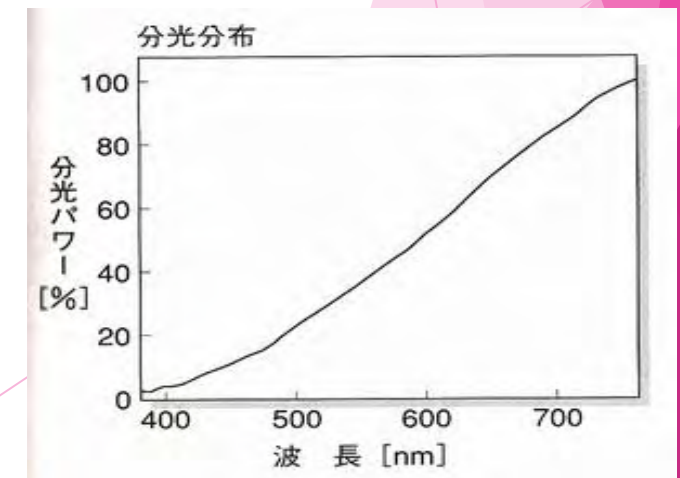
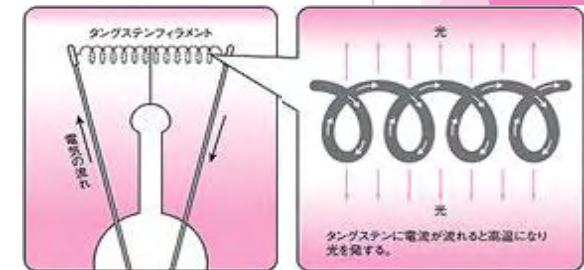
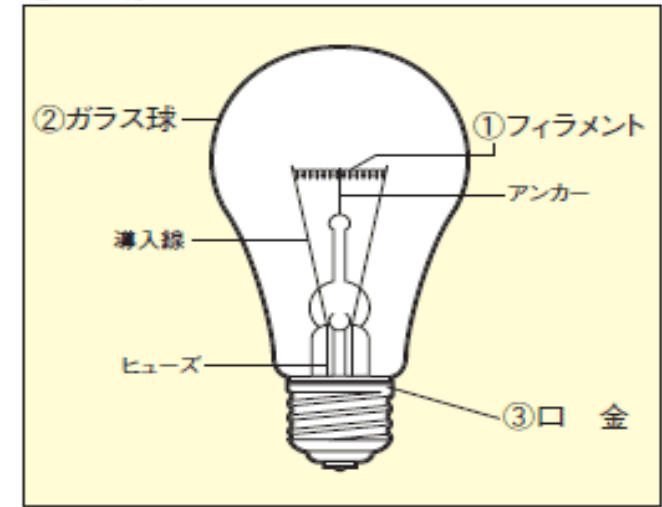
# 照明としての光

# 白熱電球

- ▶ 電球の中には導入線によって、フィラメントが固定されています。
- ▶ フィラメントは高温に強いタングステンという金属で作られ、電流を流すと電気抵抗により**2000~3000°Cの高温になり**、白熱化してプランクの法則に従って、暖かみのある白色光を発します。
- ▶ ガラス球の中は真空のものや不活性ガスを封入したものがあり、高温になるフィラメントの燃焼（酸化）や蒸発を防いでいます。

[http://www.akaricenter.com/mame/hakunetsu\\_denkyu.htm](http://www.akaricenter.com/mame/hakunetsu_denkyu.htm)

電球の構造図

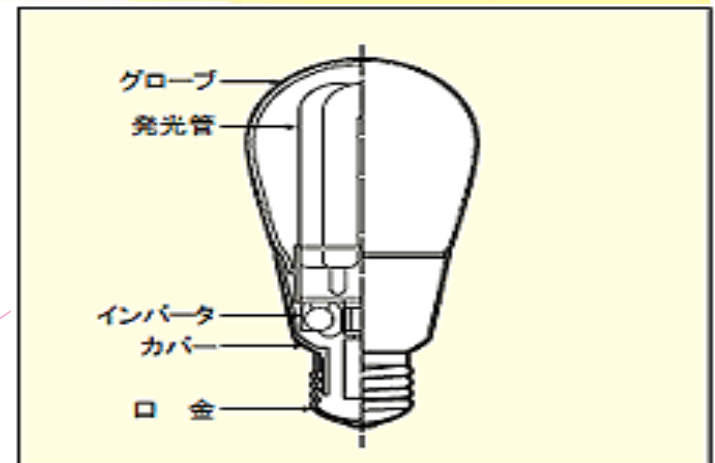
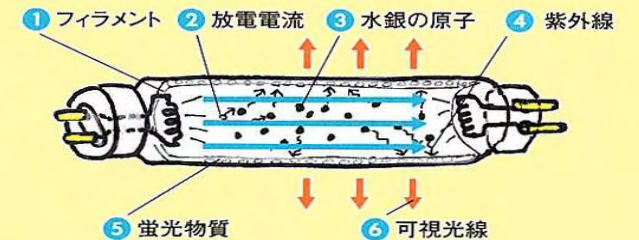


# 蛍光物質から光を出す

- ▶ 白い蛍光物質にブラックライトを使って紫外線を当てると、可視光線が出ます。この現象を蛍光と呼びます。
- ▶ 蛍光灯の中では、放電により水銀から紫外線を発生させ、蛍光物質が紫外線を受けて発光します。
- ▶ 電球型蛍光灯は、コンパクトに屈曲した発光管と点灯回路を一体化し、電球と同じ口金をつけた蛍光ランプです。

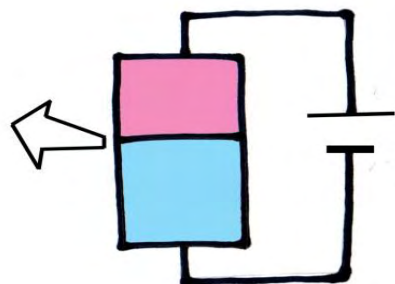


図 蛍光灯の発光のしくみ

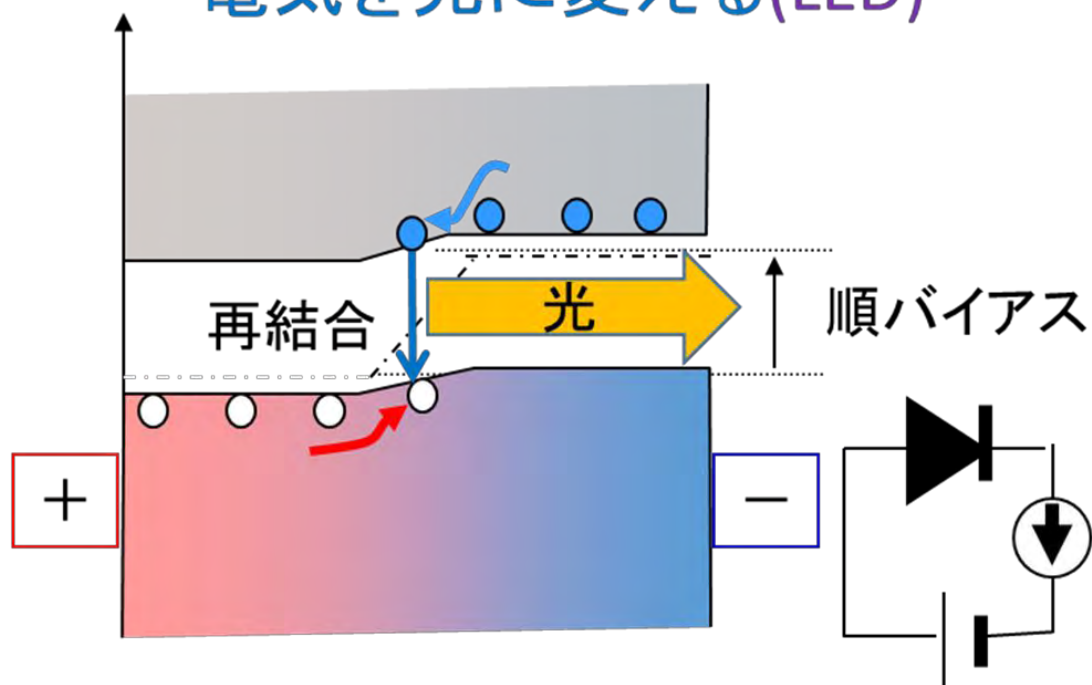


# LED:半導体に電流を流して光を出す

- ▶ LEDとはlight emitting diode（光を発するダイオード）の略です。ダイオードとは、一方方向にのみ電気が流れる半導体のしかけです。



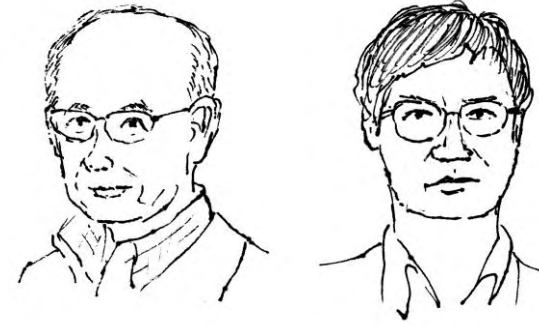
## 電気を光に変える(LED)



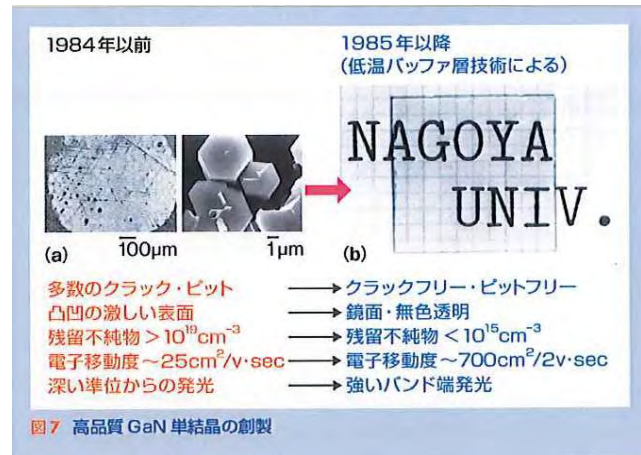
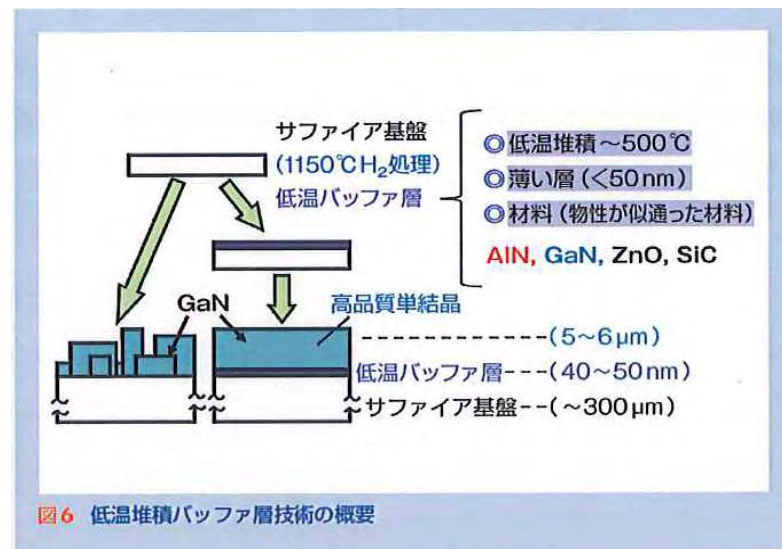
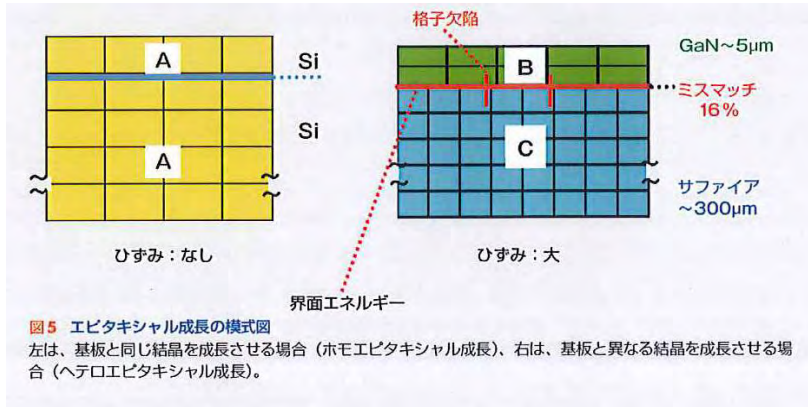
# 青色発光ダイオードはなぜ 難しいとされたのか

- ▶ 青色を出すためには、バンドギャップが2.6eV以上のワイドギャップ半導体が必要です。
- ▶ ワイドギャップ半導体は、誘電率が小さいので、ドナーやアクセプターの準位が深く（バンド端から離れている）ので、活性化しにくいという課題があります。
- ▶ ワイドギャップ半導体は結合が強いので融点が高く結晶を作りにくいという問題もあります。
- ▶ 格子整合する基板が入手できないので、格子不整合比の大きなサファイヤなどを使わなければなりません。
- ▶ P型ドーピングをすると、結晶欠陥ができてキャリアを相殺してしまう自己補償効果が起きるとされていました。

# ブレイクスルー (1)



- ▶ 当時GaN単結晶基板は存在せず、16%もの格子不整合のあるサファイア単結晶基板が用いられたため界面の転位密度が高く結晶性の悪い結晶しか得られませんでした。
- ▶ 1985年赤崎氏は、天野氏の協力を得て、**低温成長AlNバッファ層**を挿入することによって格子不整合による界面エネルギーを緩和できることを見出し、鏡面の高品質GaNの結晶成長に成功しました。このことが後の伝導度制御、pn接合LEDにもつながっています。

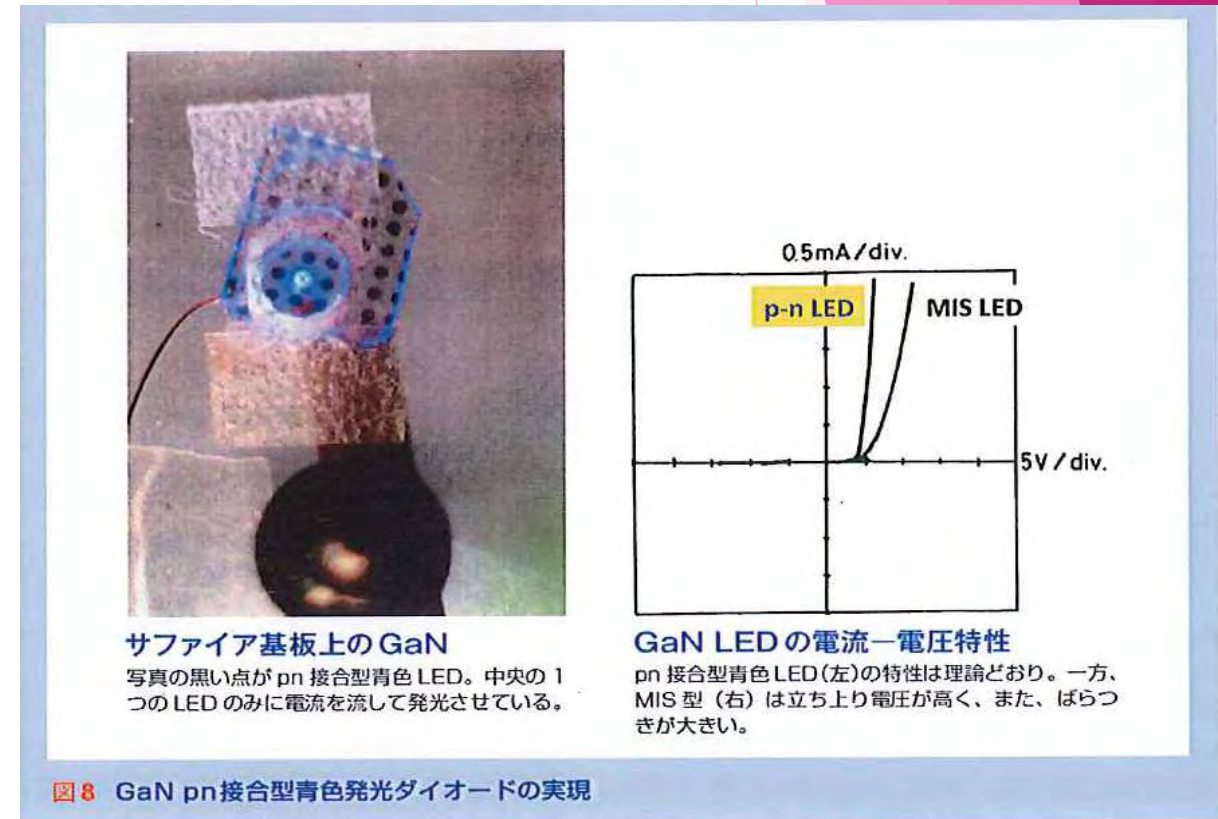


図は、科博の雑誌Milsil No.1 2014による



# ブレークスルー（2）

- ▶ 赤崎氏らは「GaNでは自己補償効果を議論するにはまだ早い。まず残留ドナーが $10^{10} \sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以下の高品質結晶を実現してから論ずべきである」と考え、低温成長バッファ層技術で得られた残留ドナー濃度の低い結晶においてZn添加を試みました。
- ▶ 1987年、天野氏がZn添加GaN単結晶を電子顕微鏡観察している際に、青紫色の発光増大を観測しました。
- ▶ 1989年になりMgドーピングしたGaNに電子線照射することで青紫色フォトルミネッセンスの増大とp型伝導性がもたらされることを確認、世界ではじめてGaNのp型結晶の作製に成功、pn接合型GaN青色LEDのプロトタイプを実現しました。

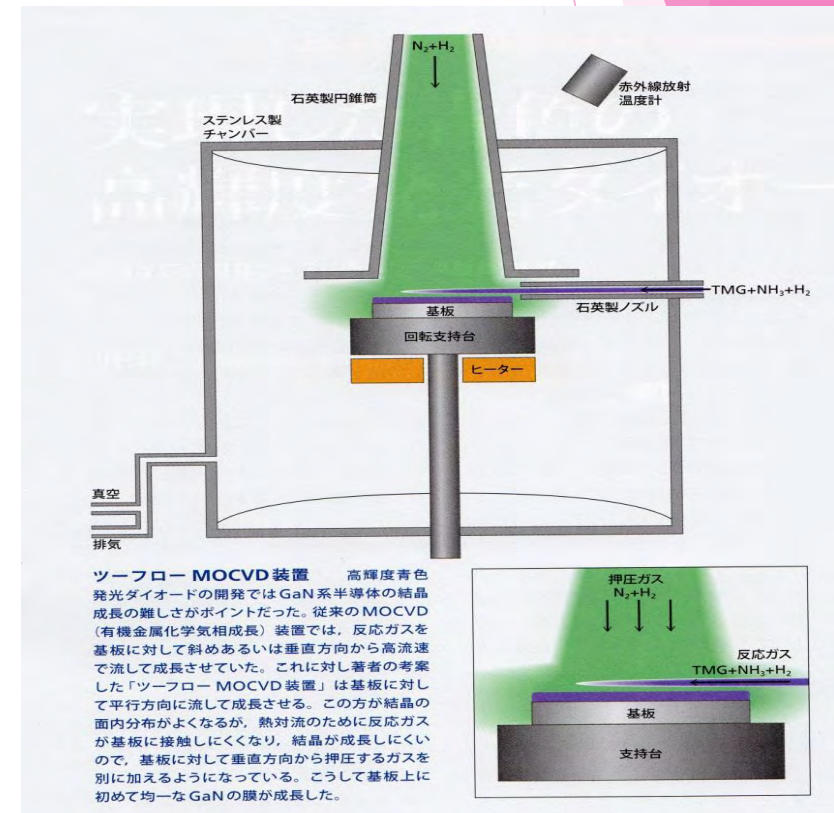




# ブレークスルー (3)

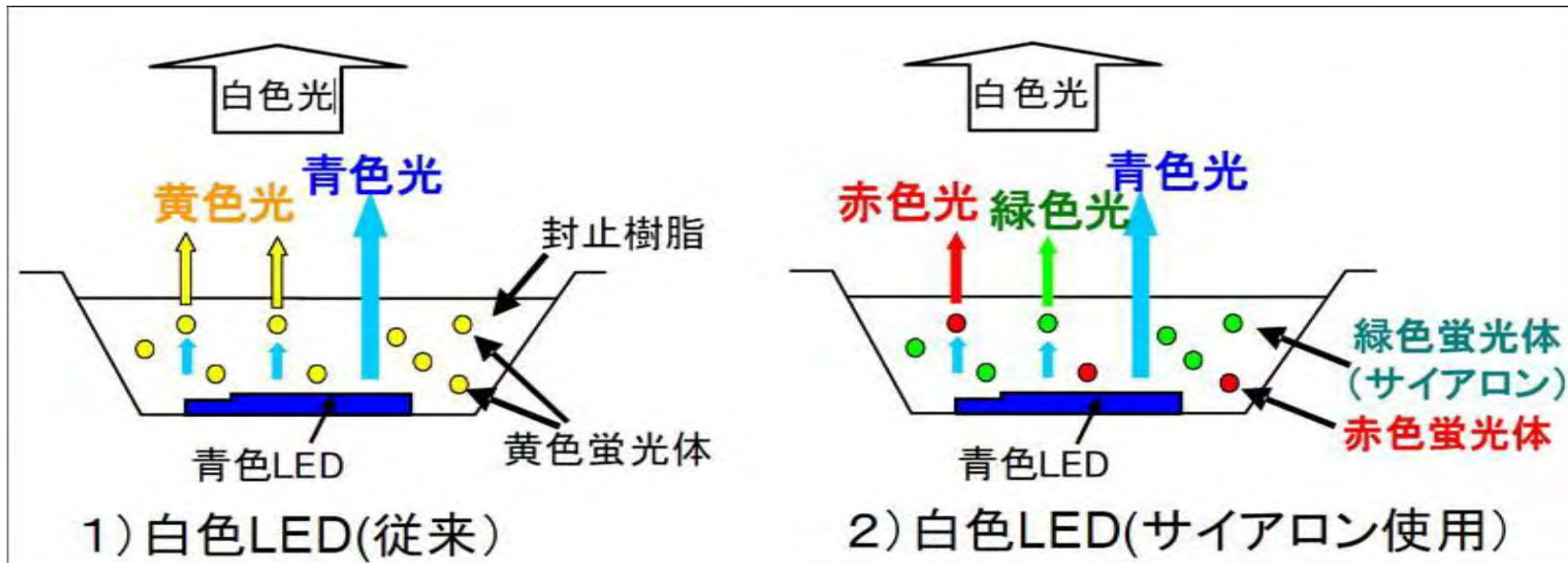
- ▶ 1989年中村氏は独自に2フロー型MOVPE装置を開発、低温成長Ga<sub>2</sub>Nバッファ層を用いGa<sub>2</sub>Nの高品質結晶成長法を確立しました。
- ▶ 中村氏が得たGa<sub>2</sub>N結晶の発光特性は赤崎氏のGa<sub>2</sub>Nより圧倒的に優れていました。
- ▶ 中村氏は1991年電子照射によらず熱処理のみでもp型結晶の作製は可能であることを示しました。
- ▶ 1992年には、InGa<sub>2</sub>N混晶の作製に成功、1993年日亜化学は高輝度青色LEDの販売を開始したのです。

図は日経サイエンス2014年12号p22より



# 白色LED

- ▶ 市販の白色LEDは、LEDの青色と、それによって励起された蛍光体の黄色(1)、または、蛍光体の赤・緑(2)の発光色を加色混合して白を出しています。
- ▶ 将来は、RGB3色のLEDによる白色が主流になるでしょう



# LED照明の利点と課題

## ▶ 利点

- (1) 低消費電力：発光効率の向上
- (2) 長寿命（40,000時間以上）
- (3) 光源としてコンパクト・軽量で省資源
- (4) 点滅を行っても寿命に影響が無く、調光・点滅が自在
- (5) 赤外線・紫外線をほとんど含まない
- (6) 低温でも発光効率が低下しない
- (7) 環境に有害な物質（水銀等）を含まない

## ▶ 課題

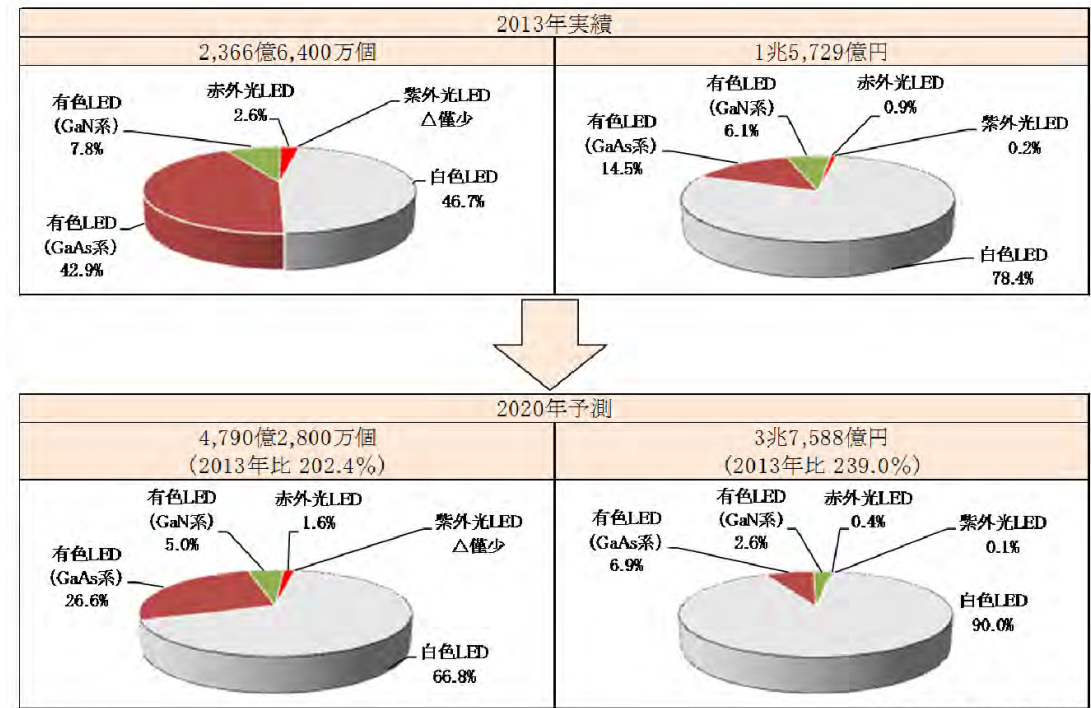
- (1) 器具光束と照明器具総合効率の更なる向上
- (2) 大電力投入時LED発光効率低下現象の改善
- (3) 更なる長寿命化
- (4) 色温度並びに演色性の改善と器具効率向上の両立
- (5) 色のばらつきの是正
- (6) ノイズ、ちらつき対策
- (7) 低価格化

# LEDの市場予測

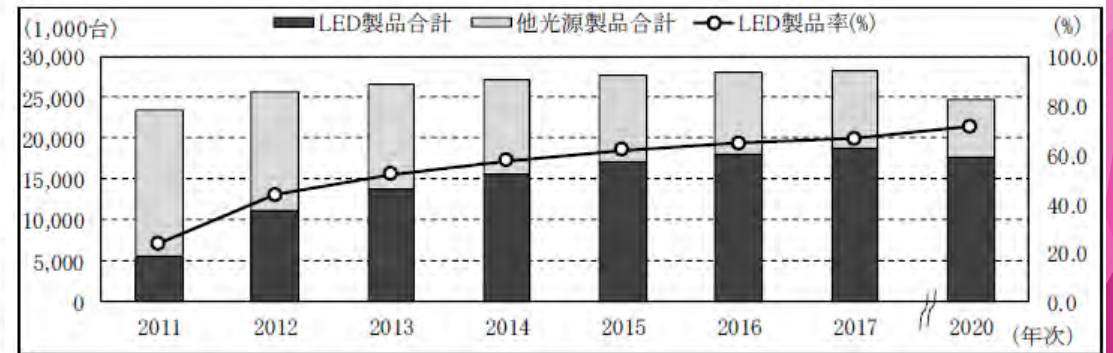
Table ES. 1 Total U.S. LED Forecast Results

	2010	2015	2020	2025	2030	Cumulative (2010-2030)
<b>Baseline site electricity consumption (TWh)</b>	<b>694</b>	<b>635</b>	<b>631</b>	<b>641</b>	<b>648</b>	<b>13,535</b>
Residential	173	142	138	146	153	3,105
Commercial	346	325	321	320	316	6,806
Industrial	58	49	44	41	38	947
Outdoor Stationary	116	119	128	135	141	2,676
<b>LED market share (% of lm-hr)</b>	-	<b>9.5%</b>	<b>35.8%</b>	<b>59.0%</b>	<b>73.7%</b>	-
Residential	-	8.1%	37.6%	60.7%	72.3%	-
Commercial	-	5.0%	27.8%	52.5%	70.4%	-
Industrial	-	8.8%	36.0%	59.2%	72.3%	-
Outdoor Stationary	-	29.0%	64.2%	81.6%	87.2%	-
<b>Site electricity savings (TWh)</b>	-	<b>21</b>	<b>122</b>	<b>217</b>	<b>297</b>	<b>2,672</b>
Residential	-	7	51	82	102	1,009
Commercial	-	6	38	73	111	902
Industrial	-	0	3	8	11	88
Outdoor Stationary	-	7	30	54	73	673
<b>Site electricity savings (%)</b>	-	<b>3.3%</b>	<b>19.4%</b>	<b>33.9%</b>	<b>45.8%</b>	<b>19.7%</b>
Residential	-	5.1%	37.3%	56.7%	66.9%	32.5%
Commercial	-	1.9%	11.7%	22.9%	35.0%	13.3%
Industrial	-	0.8%	7.4%	18.3%	29.4%	9.3%
Outdoor Stationary	-	6.2%	23.7%	40.2%	51.7%	25.2%

U.S. DOE Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications, Jan. 2012



【富士キメラ総研推定】

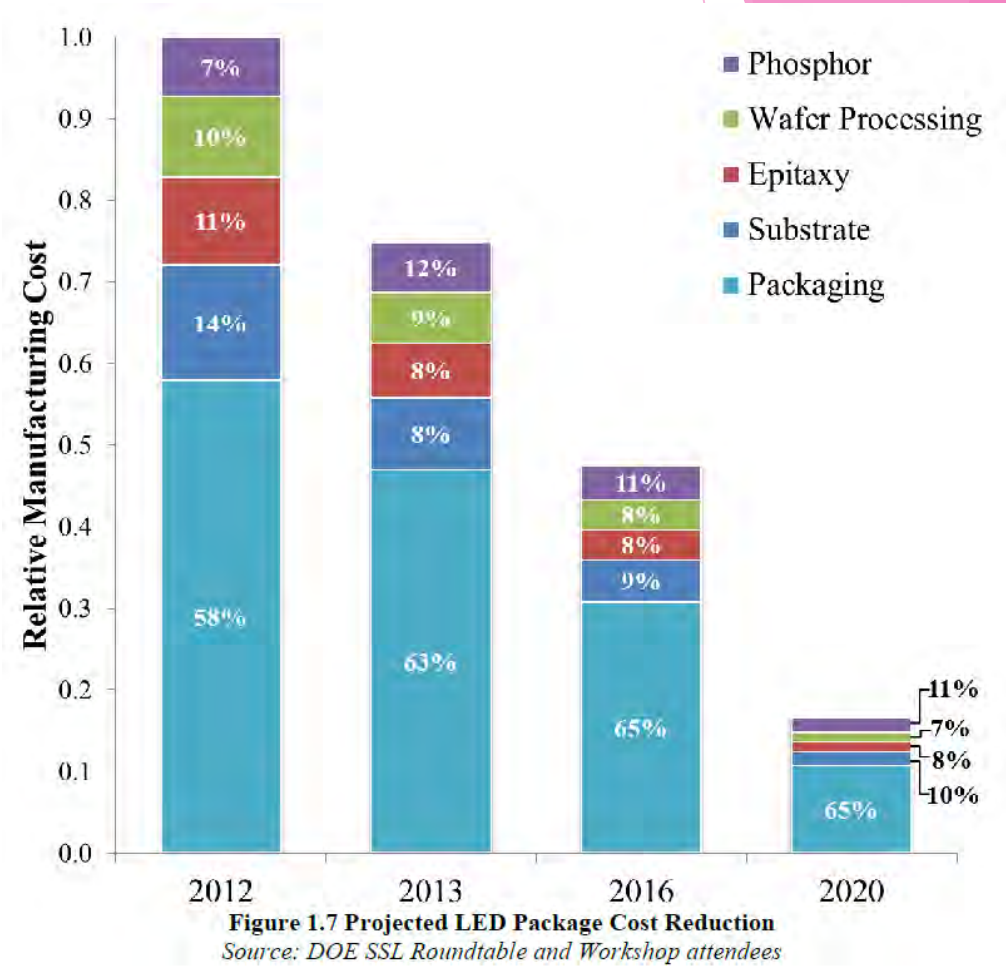
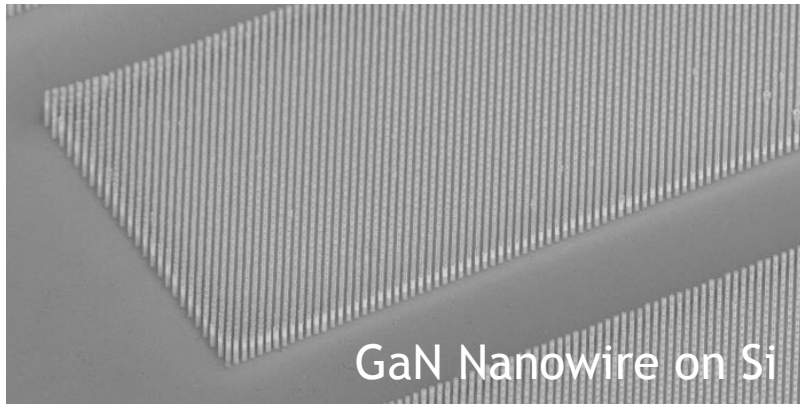


Data from Fuji Chimera Research Institute, Inc., 2014 LED Related Market Survey

天野：LED産業の今後の可能性 <http://fpcj.jp/wp/wp-content/uploads/2015/01/47f5a91d00a662832d0403561debf90.pdf>

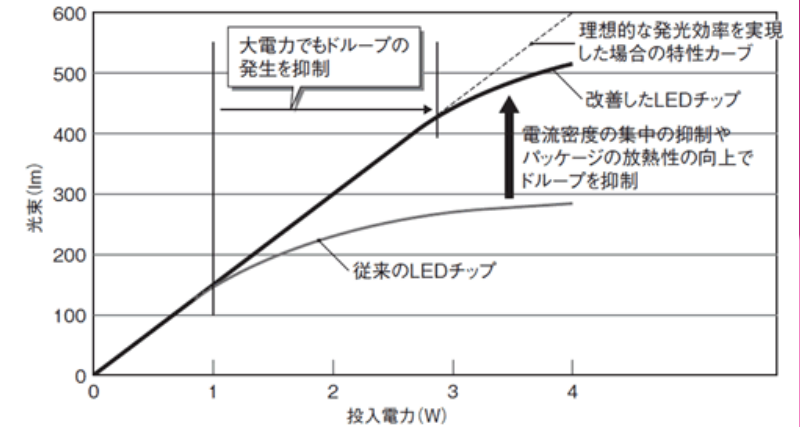
# LEDの低コスト化

- ▶ 低コスト化のための三次元構造：  
ナノワイヤLED (>8 inch Si基板上  
CMOS compatible)



# LEDドループ現象の改善(1)

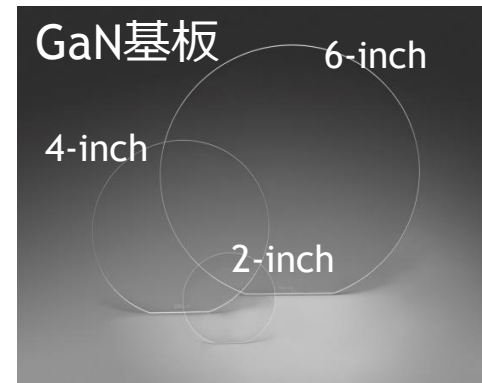
(大電力投入時LED発光効率低下現象)



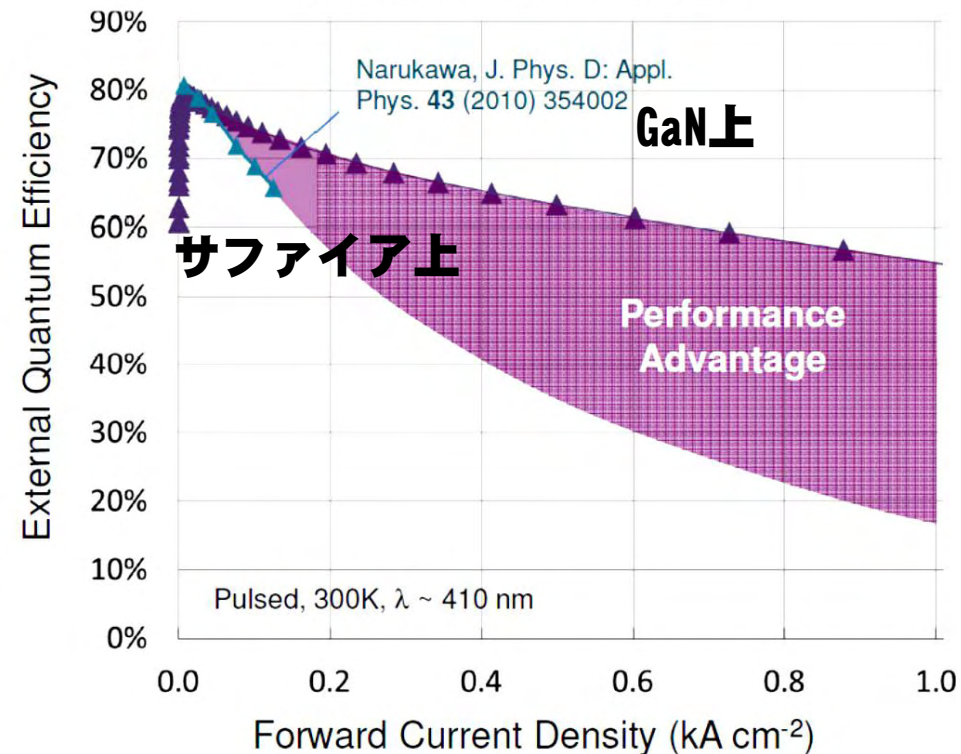
- ▶ LEDチップに大電力を投入すると発光効率が低下する現象が起きます。これを**ドループ現象**といいます。
- ▶ LED各社は、単位光束当たりのコスト削減に寄与する技術としてドループ現象の抑制に注力しています。
- ▶ この現象を抑制できれば、同じチップを使いながら、大電力を投入して光束を増やすことができます。これにより、一定の光束を得るためのチップ数を減らし、単位光束当たりコストを削減することができます。

- ▶ 大電力を投入すると、チップからの光の発生量が増えるとともに発熱も増え、この発熱がチップの内部量子効率を悪化させて、ドループ現象を引き起こすのではないかとされています。
- ▶ 現象の抑制には、放熱性の高いパッケージ構造を採用して、大電力を投入してもチップの温度が上昇しないよう工夫をしています。
- ▶ LEDチップ内を流れる電流密度が大きくなると、ドループ現象が起きやすくなるという指摘もあります。

# LEDドロープ現象の改善(2)



- ▶ サファイヤ基板ではなく、GaN基板上に窒化物LEDを成長することによって、ホモエピタキシーによって転位が減少し、転位を防ぐための複雑な構造が必要なくなります。
- ▶ 転位の減少は、Droop現象の改善につながります。
- ▶ また、基板除去のプロセスがないため、コスト低下につながります。
- ▶ **60% 駆動の場合のコスト→  
LED on sapphire 4個  
= LED on GaN 1個**



Keynote Address of M. Krames ICNS-10

# 照明以外の産業用LED応用

▶ LEDは照明、LEDバックライト以外にも多くの用途が期待されます。

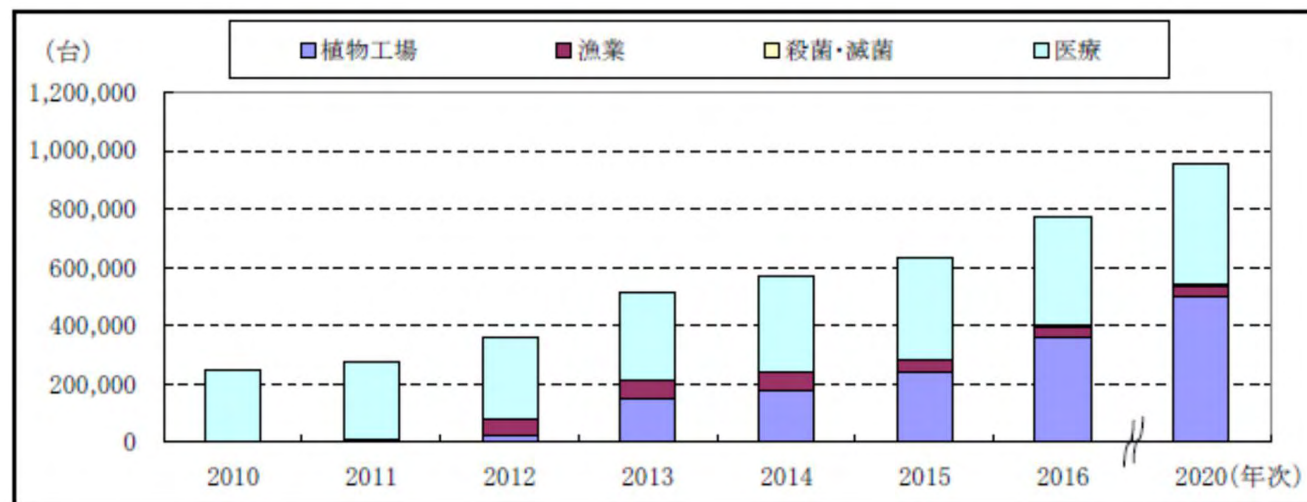
## ▶ 農業/植物工場

- ▶ 食物工場用光源
- ▶ 光遺伝学への応用
- ▶ 光遺伝学への応用

## ▶ 漁業

## ▶ 殺菌・滅菌

## ▶ 医療



(単位:台)

摘要	年次	実績			見込	予測		長期予測	
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2020
植物工場		2,100	7,100	22,350	151,000	181,700	242,500	361,000	504,000
	前年比(%)	-	338.1	314.8	675.6	120.3	133.5	148.9	-
漁業		2,000	2,000	60,000	60,000	60,000	40,000	36,000	30,000
	前年比(%)	-	100.0	3,000.0	100.0	100.0	66.7	90.0	-
殺菌・滅菌		-	-	-	△	100	700	2,100	10,700
	前年比(%)	-	-	-	-	-	700.0	300.0	-
医療		242,000	268,800	281,300	305,600	329,200	351,300	371,500	410,900
	前年比(%)	-	111.1	104.7	108.6	107.7	106.7	105.8	-
出荷数量合計		246,100	277,900	363,650	516,600	571,000	634,500	770,600	955,600
	前年比(%)	-	112.9	130.9	142.1	110.5	111.1	121.4	124.0

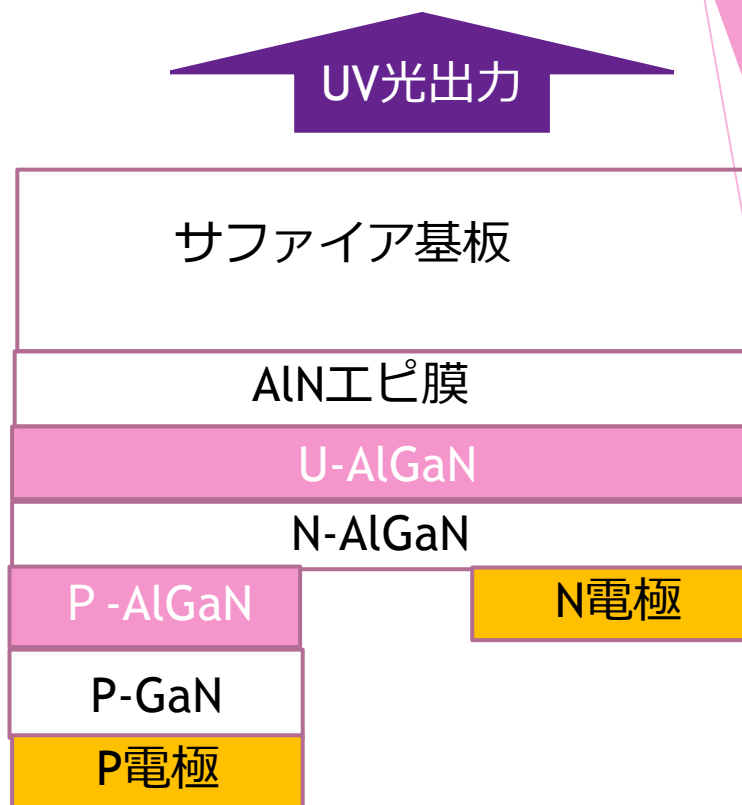
△:僅少

【富士キメラ総研推定】



# 深紫外LEDの開発

- ▶ UV-A ( $\lambda > 315\text{nm}$ )
  - ▶ 光触媒と併用による空気清浄
  - ▶ 紫外線印刷
- ▶ UV-B ( $280\text{nm} < \lambda < 315\text{nm}$ )
  - ▶ 皮膚病治療
  - ▶ DNA解析
- ▶ UV-C ( $\lambda < 280\text{nm}$ )
  - ▶ 殺菌/滅菌
  - ▶ 水質汚染センサー



- ▶ 水俣条約による水銀規制
  - ▶ 2020年までに水銀含有製品の製造・輸出・輸入を禁止
  - ▶ 電池・スイッチ・リレー・蛍光灯・水銀灯
  - ▶ 深紫外LEDの需要増

日機装のHP

<http://www.nikkiso.co.jp/products/technology/data/technology/technology01.pdf>

# ディスプレイと光

- ▶ 8K TV用100インチディスプレイ
  - ▶ 高精細
  - ▶ 高速応答
  - ▶ 省電力
  - ▶ 薄型（フレキシブル）
- ▶ 立体テレビ
  - ▶ 偏光めがね無し
  - ▶ ホログラフィ



総サイズ130インチ、65型の4K有機ELディスプレイを4枚利用した7680×4320ドット8Kで、横から見るとわかるとおり超薄型です。  
ちなみに、有機ELのデバイス自体は本当に厚さ約1mmで、張り付けているガラス板が約1mmで合計2mmです。

# 有機ELディスプレイ

(海外では有機発光ダイオードOLEDという)

有機物質のみでできた発光ダイオード

## 利点

- ▶ 自発光なので低消費電力(液晶の場合は光源の光の15%程度しか利用しない)
- ▶ 光制御を使わないので視野角に依存しない。
- ▶ フレキシブル基板を使うことが可能

## 課題

- ▶ 赤の発光効率が低い
- ▶ 高分子有機ELの寿命が短い
- ▶ 液晶と同じプロセスを使うと高コスト

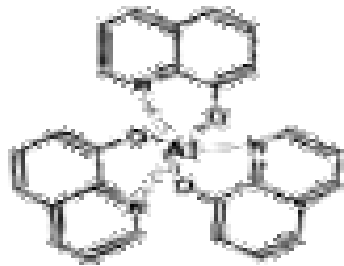
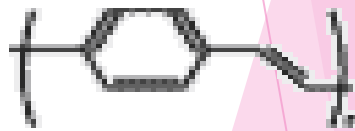
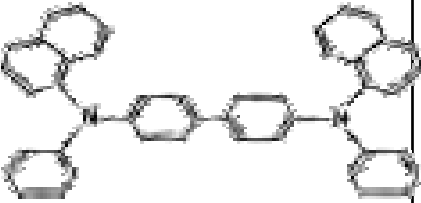
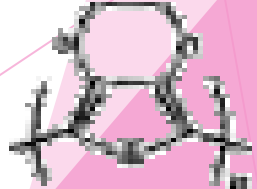
# 実用段階に入ったOLED

- ▶ サムスンは2005年5月低分子OLEDを用いた40型ディスプレイを発表



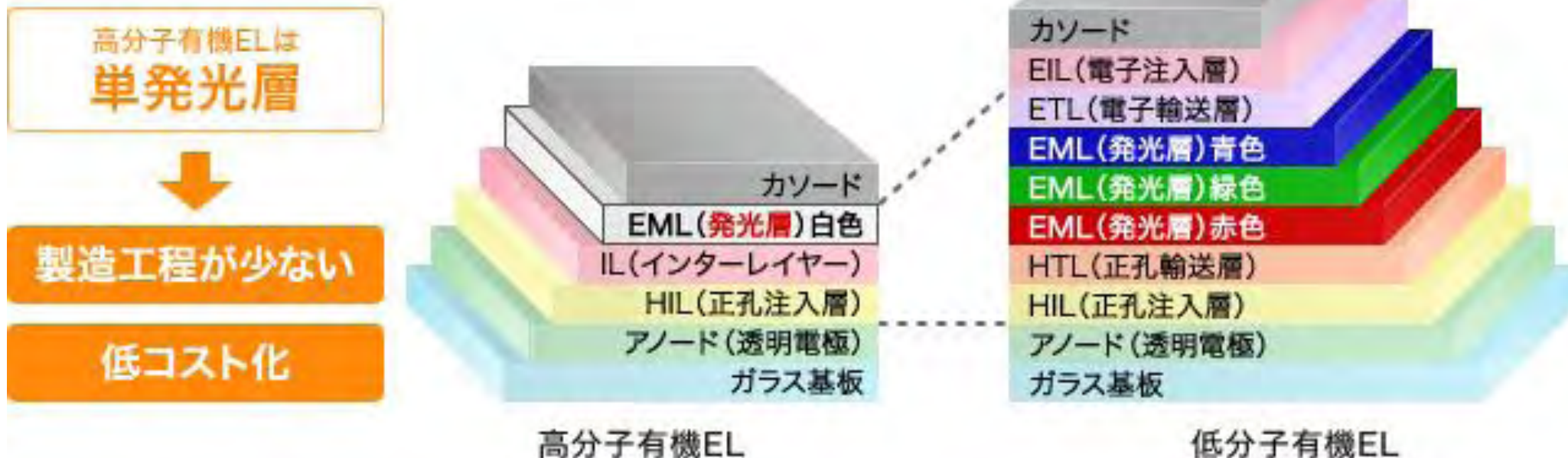
ソニーが2004年9月に発売した携帯端末クリエ

# 有機EL材料

	低分子	高分子
	昇華蒸着 大型化困難	塗布、コート 大型フレキシブル 可能
電子輸送層 発光層	Alq3 	PPV 
ホール輸送層	NPB 	PEDOT 

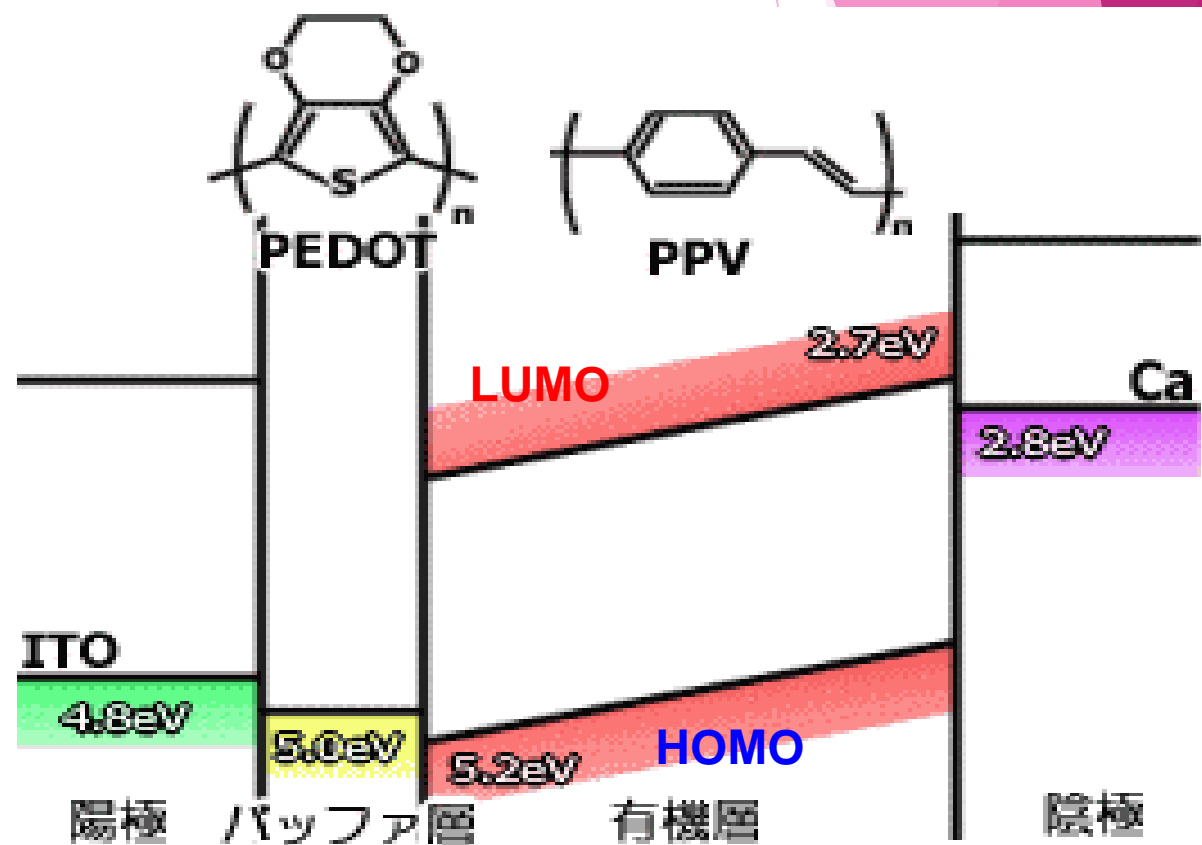
# 有機ELディスプレイの構造

- ▶ 低分子OLEDでは、発光層を電子輸送層と正孔輸送層ではさんだサンドウィッチ構造となっており、発光層で電子と正孔が再結合します。
- ▶ 高分子OLEDでは、正孔注入層からインターレイヤーを通して単発光層にホールが注入され、カソードから注入された電子と再結合します。



# 有機ELの電子構造

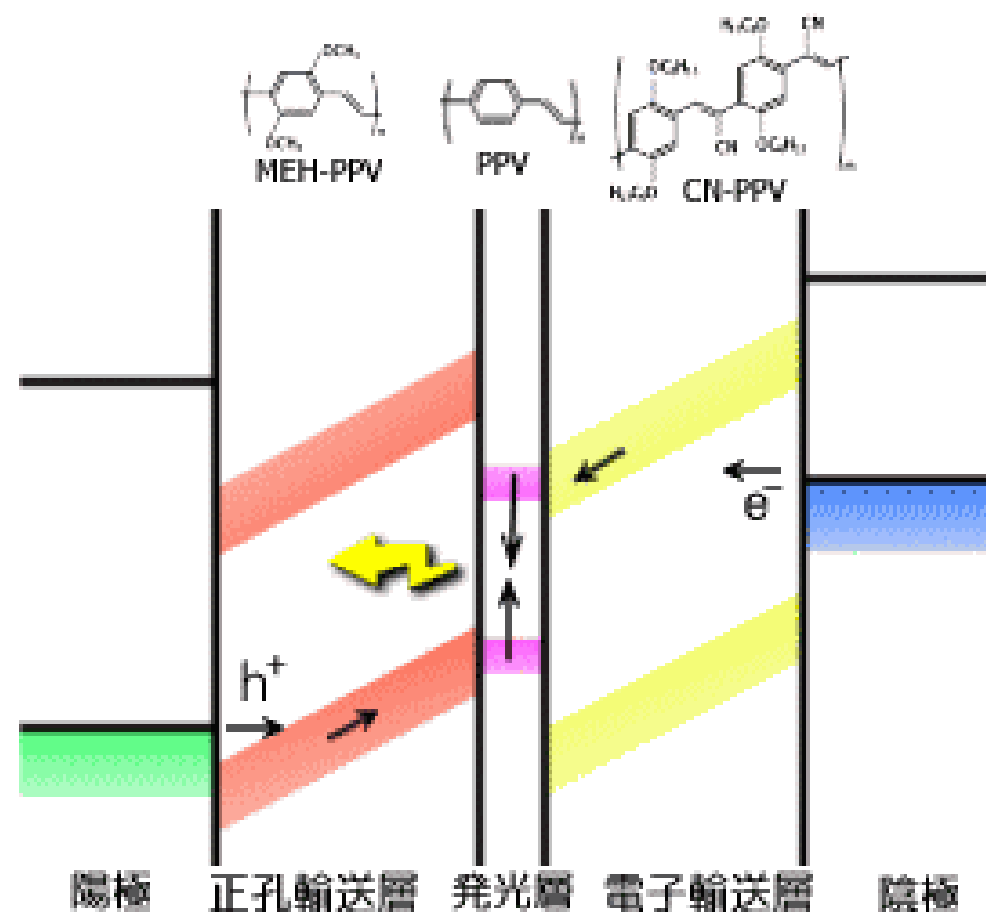
- ▶ キャリアはホッピングしながら移動し再結合します。
- ▶ 有機層は数十～数百nmの薄さです。
- ▶ バッファ層の導入でホール注入効率を改善しています。
- ▶ 陰極金属にCaを使うことで電子注入効率改善しています。



LUMO=lowest unoccupied molecular orbital  
HOMO=highest occupied molecular orbital

# ヘテロ構造有機EL

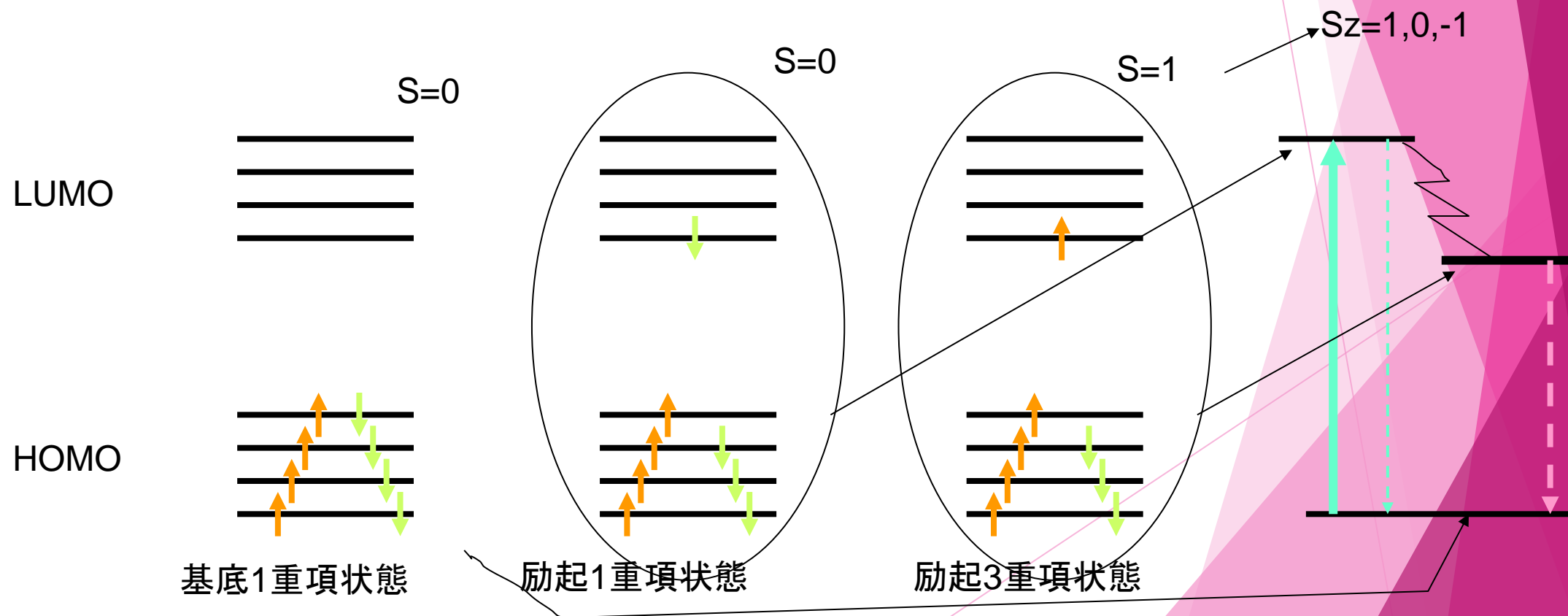
- ▶ 有機層が三つの有機分子の層から構成されていて、順バイアスのかけたときのエネルギー関係は上図のようになっています。
- ▶ 正孔を注入する陽極とPPV層の橋渡役をするMEH-PPVは、**正孔輸送層(HTL)**と呼ばれています。
- ▶ 一方、電子を注入する陰極とPPV層の橋渡役をするCN-PPVは、**電子輸送層(ETL)**と呼ばれています。
- ▶ また、キャリアが閉じ込められるPPV層で再結合が起こり発光するので、PPV層は**発光層(EML)**と呼ばれています。





# 発光効率の改善：3重項からの燐光利用

- ▶ LUMO(1重項)→HOMO(1重項):短寿命
- ▶ LUMO(3重項)→HOMO(1重項):長寿命



# 曲げられるディスプレイ

- ▶ 大日本印刷は2001年フレキシブル有機EL（単色）を発表した。
- ▶ NHKは2003年フレキシブルなフルカラー有機ELディスプレイを発表した。



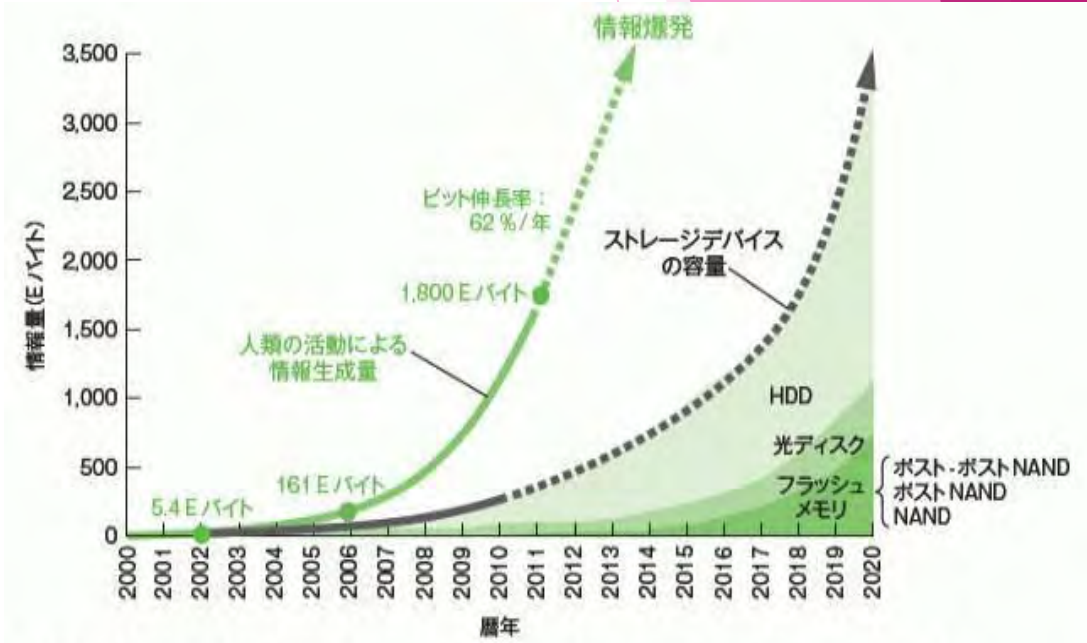
フレキシブルカラー  
有機ELディスプレイの試作品

# 情報通信と光テクノロジー

# 情報と光

- ▶ 2020年に世界のデジタルデータは40ZBに達すると言われています。
- ▶ 情報通信は光ファイバーを使った多重通信によって高速・大容量になりました。
- ▶ 情報の記録はHDDが主流ですが記録密度の限界が来ています。これを打破するために光アシスト記録が検討されています。
- ▶ 長期保存メモリとしてはBDなど光ディスクが使われています。
- ▶ ホログラフィックメモリも検討されています。

情報爆発（2020年には40ZBに）



\*東芝(HDD)及び日本記憶メディア工業会(CD, DVD, Blu-ray Disc™(注2))のデータをベースに東芝で試算

図2. ストレージ市場のビット伸張予測 — 情報爆発の速度に、ストレージ市場全体の容量が既に追いついていない。

IDC2012より

Forecast of bit expansion in storage market

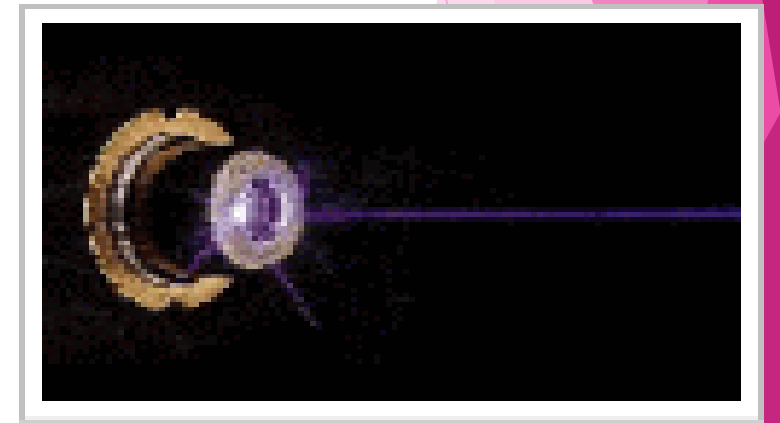
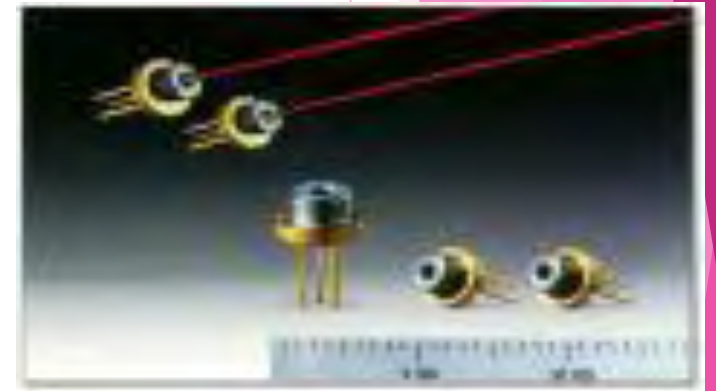
# 光通信の要素技術

- ▶ 光源：半導体レーザー(LD=laser diode)
  - ▶ pn接合, DH構造, DFB構造, 高速化
- ▶ 線路：光ファイバー
  - ▶ 全反射, レーリー散乱, 分子振動
- ▶ 光検出器：フォトダイオード(PD)
  - ▶ アバランシェ型(APD)
- ▶ 中継器：ファイバーアンプ(EDFA)
- ▶ 光制御器：アイソレータ、アッテネータ、サーキュレータ

## 要素技術(1)

### 半導体レーザー LD (laser diode)

- ▶ LED構造において、劈開面を用いたキャビティ構造を用いるとともに、ダブルヘテロ構造により、光とキャリアを活性層に閉じ込め、反転分布を作る。
- ▶ DFB構造をとることで特定の波長のみを選択している。



# 半導体レーザーの材料

- ▶ 光通信帯用 : 1.5 $\mu$ m; GaInAsSb, InGaAsP
- ▶ CD用 : 780nm GaAs
- ▶ DVD用 : 650nm GaAlAs MQW
- ▶ 次世代DVD用 : 405nm InGaN

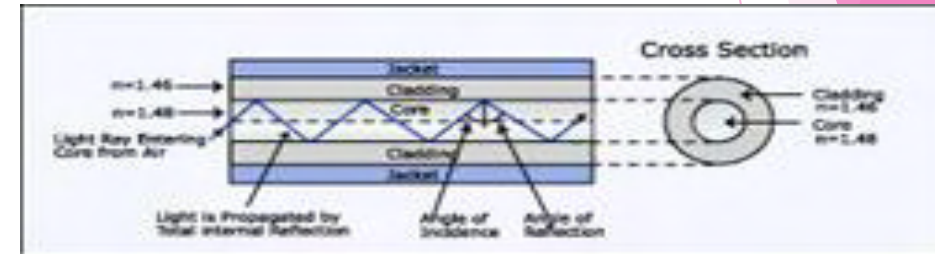
バルク基板にMOVPE、MBEなど気相成長によって薄膜をエピタキシャル成長しています。

MOVPE : metal-organic vapor phase epitaxy

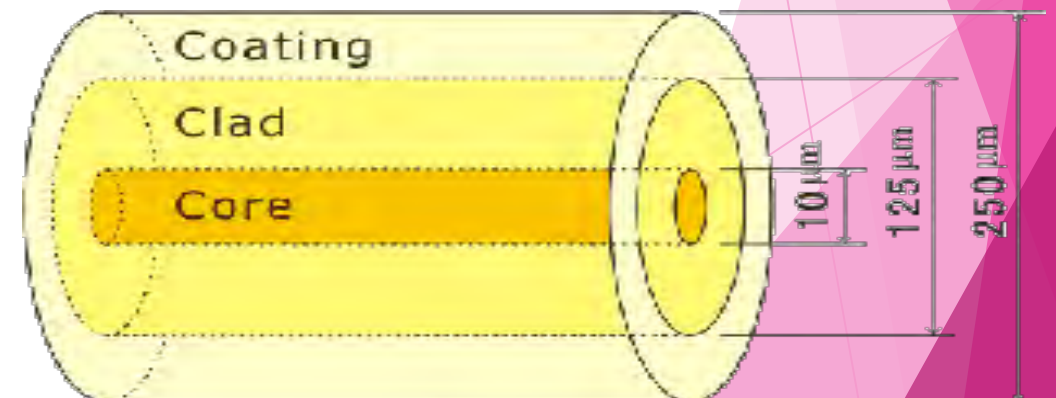
MBE: molecular beam epitaxy

# 要素技術(2) 光ファイバー

- ▶ 材料：溶融石英(fused silica  $\text{SiO}_2$ )
- ▶ 構造：同心円状にコア層、クラッド層、保護層を配置してあります。
- ▶ 光はコア層を全反射によって長距離にわたり低損失で伝搬します。



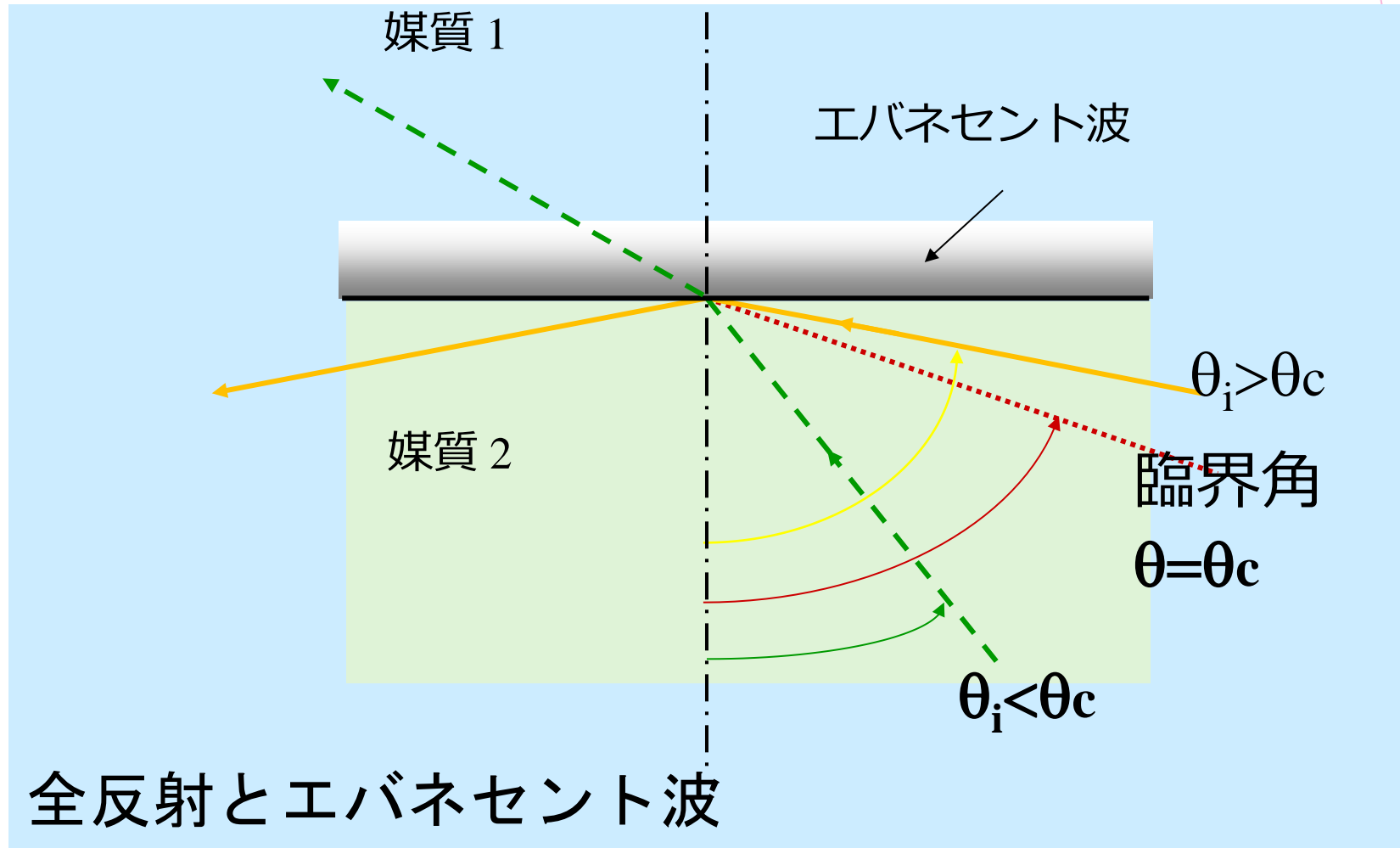
<http://www.miragesofttech.com/ofc.htm>



東工大影山研HPより

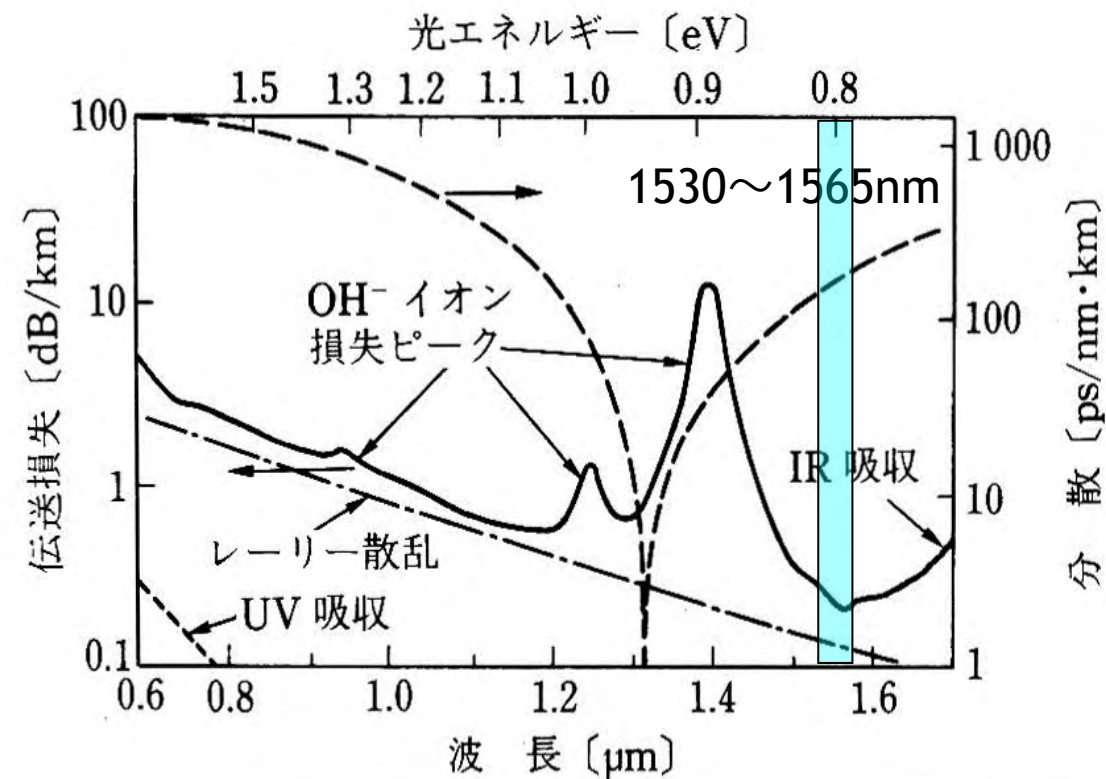


# 全反射



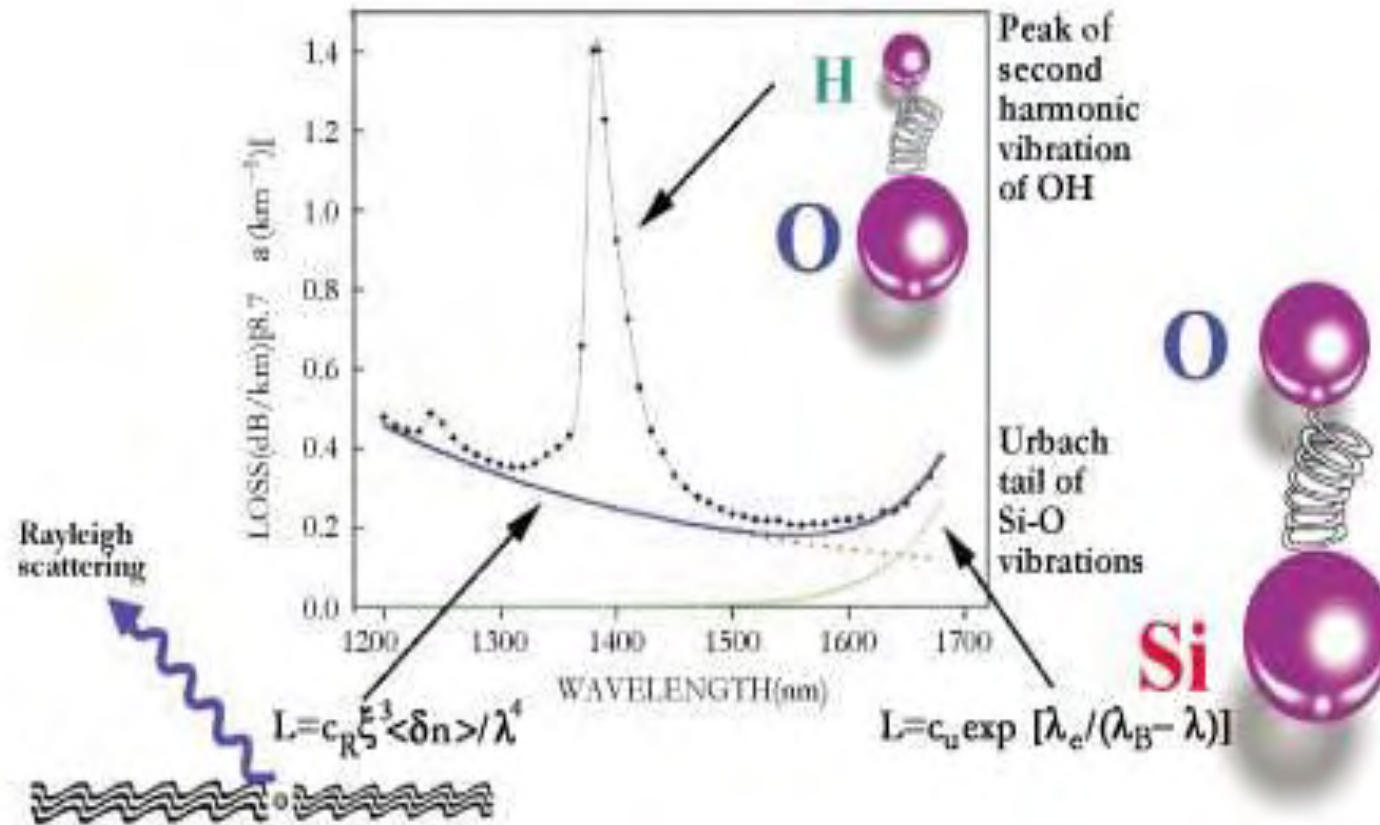
# 光ファイバーの伝搬損失

- ▶ 短波長側の伝送損失はレーリー散乱によります。
- ▶ 長波長側の伝送損失は分子振動による赤外吸収です。
- ▶ 1.4 $\mu\text{m}$ 付近の損失はOHの分子振動によります。



超低損失光ファイバの伝送損失および分散特性

# 光ファイバーの伝搬損失



Physics Today Onlineによる

<http://www.aip.org/pt/vol-53/iss-9/captions/p30cap1.html>

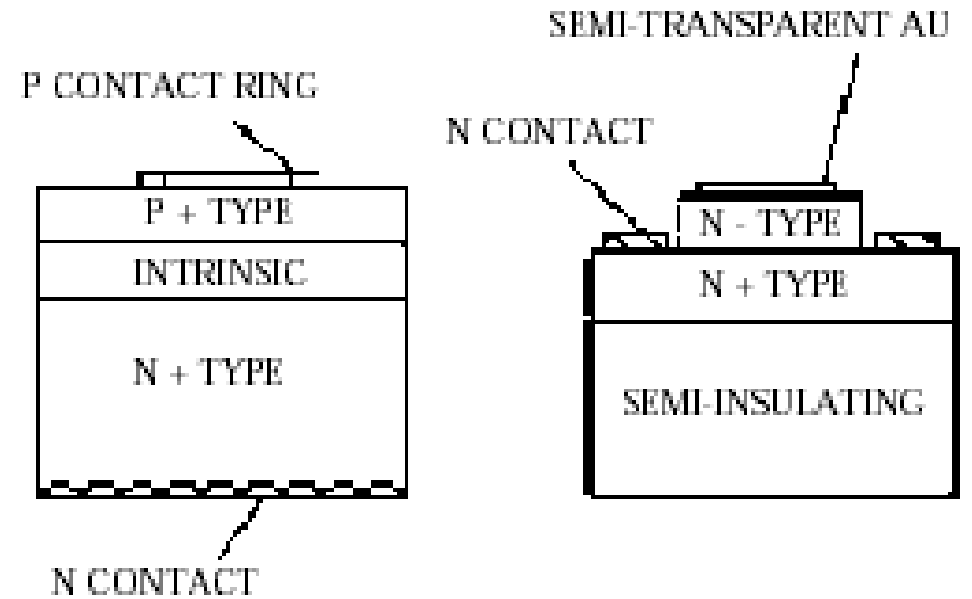
## 要素技術(3)

# 光検出

- ▶ フォトダイオードを用います。
- ▶ 高速応答の光検出が必要です。
- ▶ pinフォトダイオードまたはショットキー接合フォトダイオードが使われます。  
(注：ショットキー接合：金属と半導体の接合)
- ▶ 通信用PDの材料としてはバンドギャップの小さなInGaAsなどが用いられています。

# 光検出器

- ▶ pin-フォトダイオード  
ショットキー フォトダイオード
- ▶ 応答性は、空乏層をキャリアが走行する時間と静電容量で決まります。
- ▶ このため、空乏層を薄くするとともに、接合の面積を小さくしなければなりません。

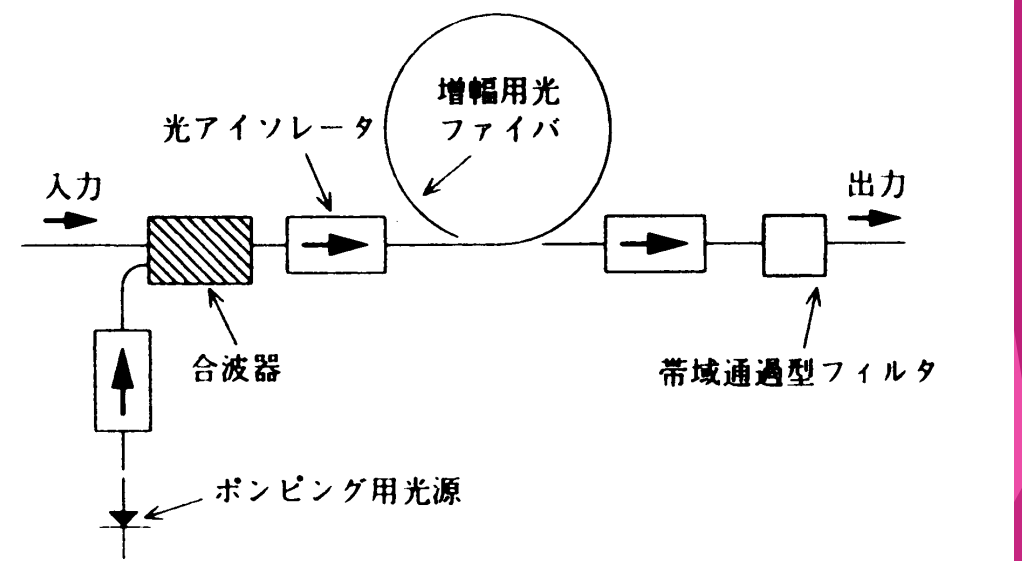


*FIGURE 1: The high-field region is the intrinsic layer in the p-i-n photodiode (left) and the n-region in the Schottky photodiode (right).*

## 要素技術(4)

# 光中継：ファイバーアンプ

- ▶ 光ファイバー中の光信号が100km程度の距離を伝搬すると、20dB (1/100) 減衰します。これをもとの強さに戻すために光ファイバーアンプと呼ばれる光増幅器が使われています。
- ▶ 光増幅器(EDFA)は、エルビウム(Er)イオンをドープした光ファイバー (EDF:Erbium Doped Fiber) と励起レーザーから構成されており、励起光といわれる強いレーザーと減衰した信号光を同時にEDF中に入れることによって、Erイオンの誘導増幅作用により励起光のエネルギーを利用して信号光を増幅することができます。



旭硝子の

HP<http://www.agc.co.jp/news/2000/0620.html>より

# エルビウムの増幅作用

- ▶ エルビウム (Er) イオンをドーブしたガラスは、980nmや1480nmの波長の光を吸収することによって1530nm付近で発光します。この発光による誘導放出現象を利用することによって光増幅が可能になるのです。具体的には、EDFに増幅用のレーザー光を注入すると、Erイオンがレーザー光のエネルギーを吸収し、エネルギーの高い状態に一旦励起され、励起された状態から元のエネルギーの低い状態に戻るときに、信号光とほぼ同じの1530nm前後の光を放出します（誘導放出現象）。信号光は、この光のエネルギーをもらって増幅されます。
- ▶ Erをドーブするホストガラスの組成によって、この発光の強度やスペクトル幅（帯域）が変化します。発光が広帯域であれば、光増幅できる波長域も広帯域になります。

# 要素技術(5)

## 光アイソレータ

- ▶ 光アイソレータ：光を一方向にだけ通す光デバイス。
- ▶ 光通信に用いられている半導体レーザー(LD)や光アンプは、光学部品からの戻り光により不安定な動作を起こす。
- ▶ 光アイソレータ：出力変動・周波数変動・変調帯域抑制・LD破壊などの戻り光による悪影響を取り除き、LDや光アンプを安定化するために必要不可欠な光デバイス。



信光社

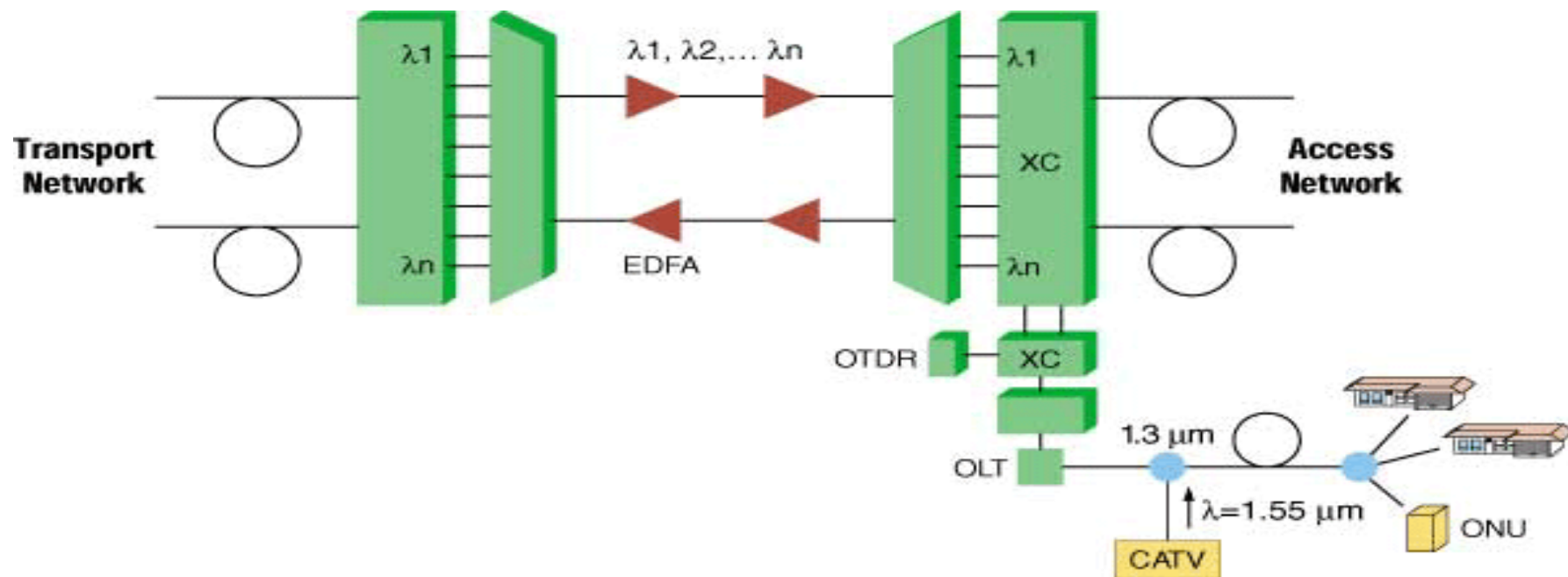
<http://www.shinkosha.com/products/optical/>



## 要素技術(6)

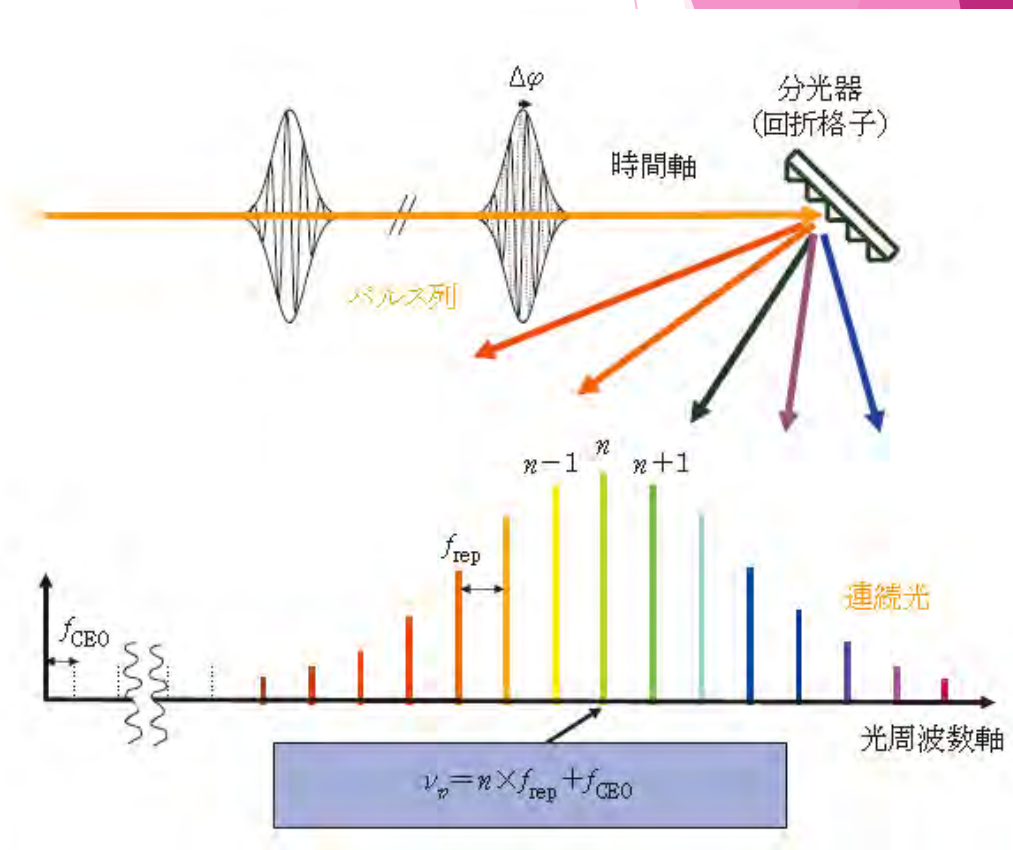
### 波長多重(WDM=wavelength division multiplexing)

- ▶ この方式は、波長の異なる光信号を同時にファイバー中を伝送させる方式であり、多重化されたチャンネルの数だけ伝送容量を増加させることができる。
- ▶ 通信用光ファイバーは、1450~1650nmの波長域の伝送損失が小さい(0.3dB/km以下)ため、原理的にはこの波長域全体を有効に使うことができる。



# 周波数安定化技術（光コム）

- ▶ 光コムは、超短パルスを発生させるモード同期レーザーからの出力光のことで、そのスペクトルの周波数軸上での様子が、等間隔に並んだたくさんのモードの姿をとることから、櫛(くし)の歯に見立てて、光周波数の櫛 (optical frequency comb) と呼ばれます。
- ▶ 図に示すように、この超短パルスの光を、回折格子などの分散素子に入れると、たくさんのモードに対応するたくさんの光線に分波されます。
- ▶ しかも不思議なことに、分かれた後のそれらの光は、パルスではなく連続光となっているのです。
- ▶ この技術は「光周波数の物差し」として用いることができ、さらに、光冷却による18桁の精度をもつ「光格子時計」の技術にも結びつきました。



# 光格子時計

- ▶ 2001年、ERATO香取創造時空間プロジェクトの研究総括は、最先端のレーザー技術を駆使して、セシウム原子時計を遙かに凌ぐ新しい原子時計「光格子時計」を発案しました。この「光格子時計」では、極低温に冷却し（レーザーで作った）光の格子に捕まえた、およそ100万個の原子が吸収する光の周波数を測定し、正確な1秒を決めます。この「光格子時計」は、理論的には宇宙の年齢（137億年）経っても、1秒の以下の誤差しか生じません。セシウム原子時計をはるかに凌駕する時間計測が可能になります。

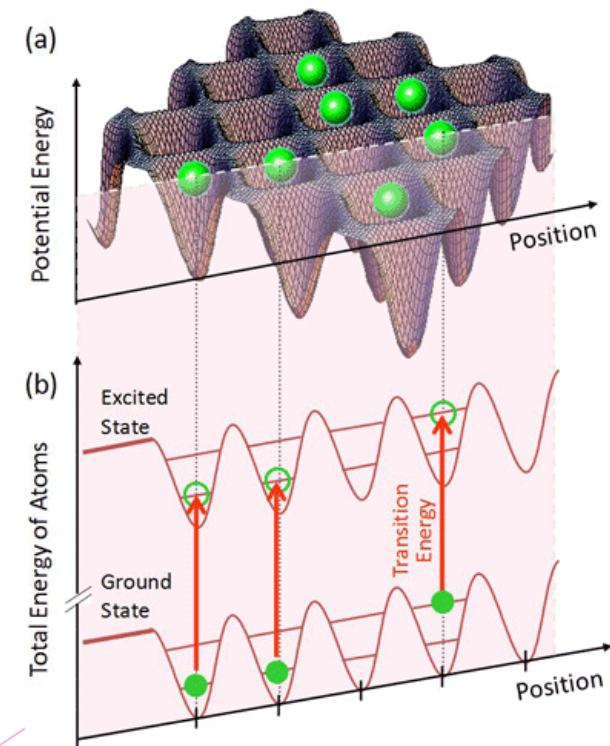
## (1) 極限まで原子を冷やすレーザー技術

原子の熱運動を極限まで小さくするために、レーザーを用いて原子の運動エネルギーを絶対0度（摂氏 $-273.15^{\circ}\text{C}$ ）に近い温度まで冷却する技術を開発しました。狭線幅レーザー冷却法と呼ばれています。

## (2) 魔法波長

光格子時計では、レーザー光の干渉でできる光の格子に、原子を閉じ込めます。しかし、一般には、その代償として、原子のエネルギーが空間的に変化して、原子時計の性能が低下します。香取は、特定の波長のレーザー光を使って原子を閉じ込めると、原子が吸収する光の振動数は、閉じ込めによる影響を受けないことを発見しました。この波長は「魔法波長」と呼ばれています。

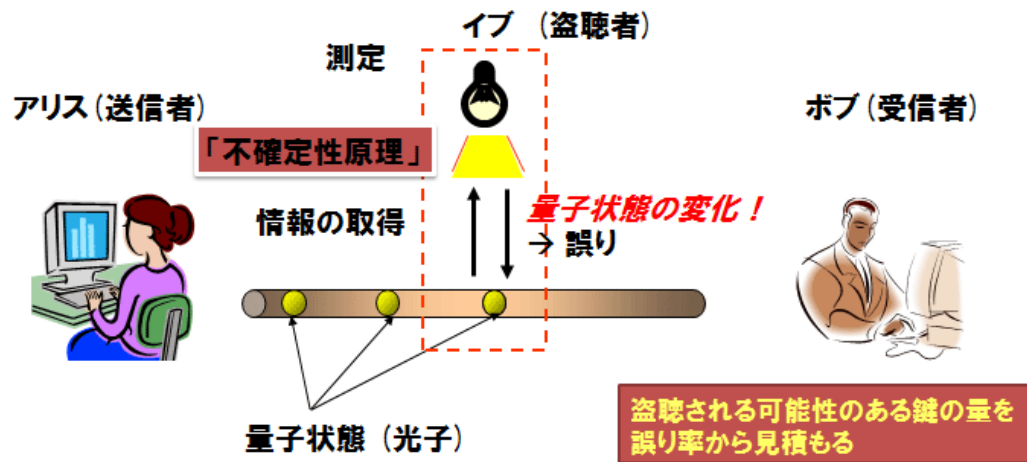
ERATO 香取創造時空間プロジェクト



# 量子光通信

- ▶ 従来の量子鍵：不確定性原理を利用  
盗聴すると誤りが出る。
- ▶ 新しい量子通信：量子状態の収縮を利用

QKD: 暗号通信のための「鍵」を離れた2者間で安全に共有する



従来のQKD: 不確定性原理を利用したQKD→盗聴すると誤りが出る

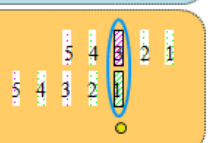
RRDPS: 測定における波束 (量子状態) の収縮を利用したQKD→そもそも読めない



ボブがどの遅延時間の位相差の読み出しに成功するかは、  
(L-1) 個の中からランダムに選んだ遅延時間に依存するので、  
イブは制御できない



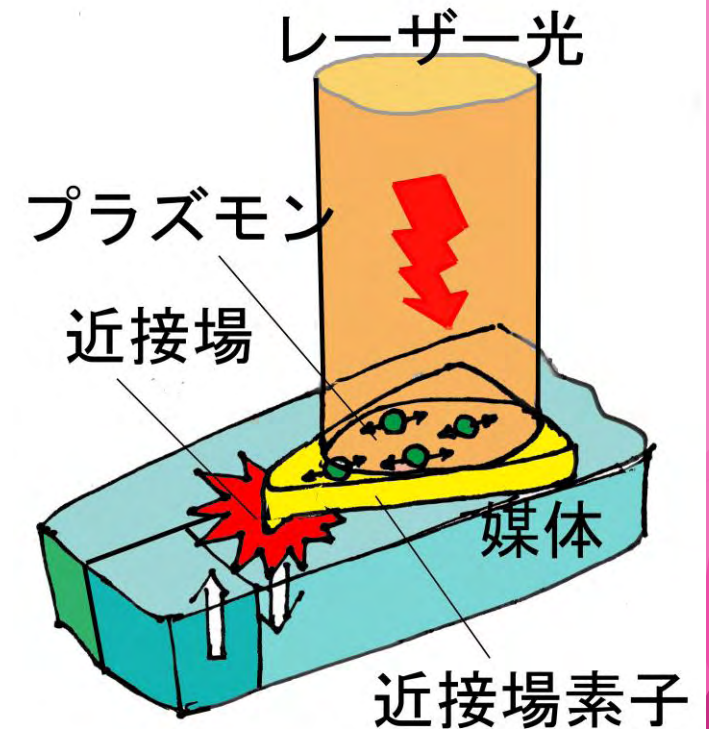
アリスから送り出されるL連パルスのどのパルスで光子が  
測定されるかはランダムなので、イブは特定の  
2パルス間の位相差を狙って読み出すことはできない



イブの盗聴は、自分が位相差を読み出した2パルスが  
偶然ボブと一致したときに成功する  
この偶然の確率はパルス数Lのみにより依存し、誤り率に無関係

# ストレージと光

- ▶ 情報爆発の時代にストレージが追いつきません。
- ▶ 磁気記録は、GMR,TMRなど磁気抵抗素子の導入と、垂直磁気記録方式の採用によって、面記録密度1Tb/in<sup>2</sup>まで到達しましたが、熱揺らぎによって情報が失われる超常磁性限界を迎えています。
- ▶ 面記録密度を2Tb/in<sup>2</sup>以上に向上するには、磁気異方性の大きな記録媒体を使われなければなりません。しかし、保磁力H<sub>c</sub>が高くなって記録用磁気ヘッドの磁界では書けないという問題が生じます。
- ▶ そこで、記録の際に、レーザー光で加熱して保磁力を一時的に下げて記録するのが、HAMR（熱アシスト記録）です。
- ▶ ビットサイズは10nmのオーダーなので、近接場トランスデューサを使って狭いエリアに光を集中させます。



# 医療・保健と光

- ▶ 内視鏡は体内器官のイメージングにとどまらず、治療にも使われています。
- ▶ 眼の治療にはレーザーが用いられています。
- ▶ 近赤外線を用いたがん治療も注目されています。
- ▶ 殺菌灯は、水銀フリーの深紫外LEDにおきかえられつつあります。
- ▶ 近接場蛍光顕微鏡が医学・生理学研究に使われています。
- ▶ マイクロ流路はフォトリソで作製されています。

# 安全・安心・見守り

- ▶ 自動運転用ライダー（レーザレーダ）→赤外線ライダー
- ▶ 自動運転用イメージセンサー＋画像認識・処理
- ▶ 防犯カメラ＋画像認識・処理
- ▶ ロボットの眼
- ▶ インフラ点検

# 産業と光

## 工業

- ▶ リソグラフィ
  - ▶ EUV、X線、放射光
  - ▶ 位置合わせ：レーザ干渉計
- ▶ 加工
  - ▶ 切断・溶接
- ▶ 造形
  - ▶ 3Dプリンタ

## 農業

- ▶ 植物工場用照明
- ▶ 誘蛾灯・殺菌灯
- ▶ 太陽光発電との両立（ソーラーシェア）
- ▶ リモートセンシング



## おわりに

- ▶ これまで述べたように、光テクノロジーは、これからの暮らしを支えるキーテクノロジーです。時間の制約のため、そのうちの一部だけをご紹介します。
- ▶ 光テクノロジーは、エネルギー、照明、情報通信、交通、安全安心、工業、医療、農業など広い分野で応用される重要な技術です。
- ▶ 特に、IoT/AI時代を支える重要な技術であり、さらなる研究開発が求められています。
- ▶ 山口大学「光・エネルギー研究センター」の役割が期待されます。