

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

*****: 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC: 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

: パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし: 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2013, 荒川 泰彦

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2013, Yasuhiko Arakawa

学術俯瞰講義第7回

量子ドットがもたらす 未来素子の夢

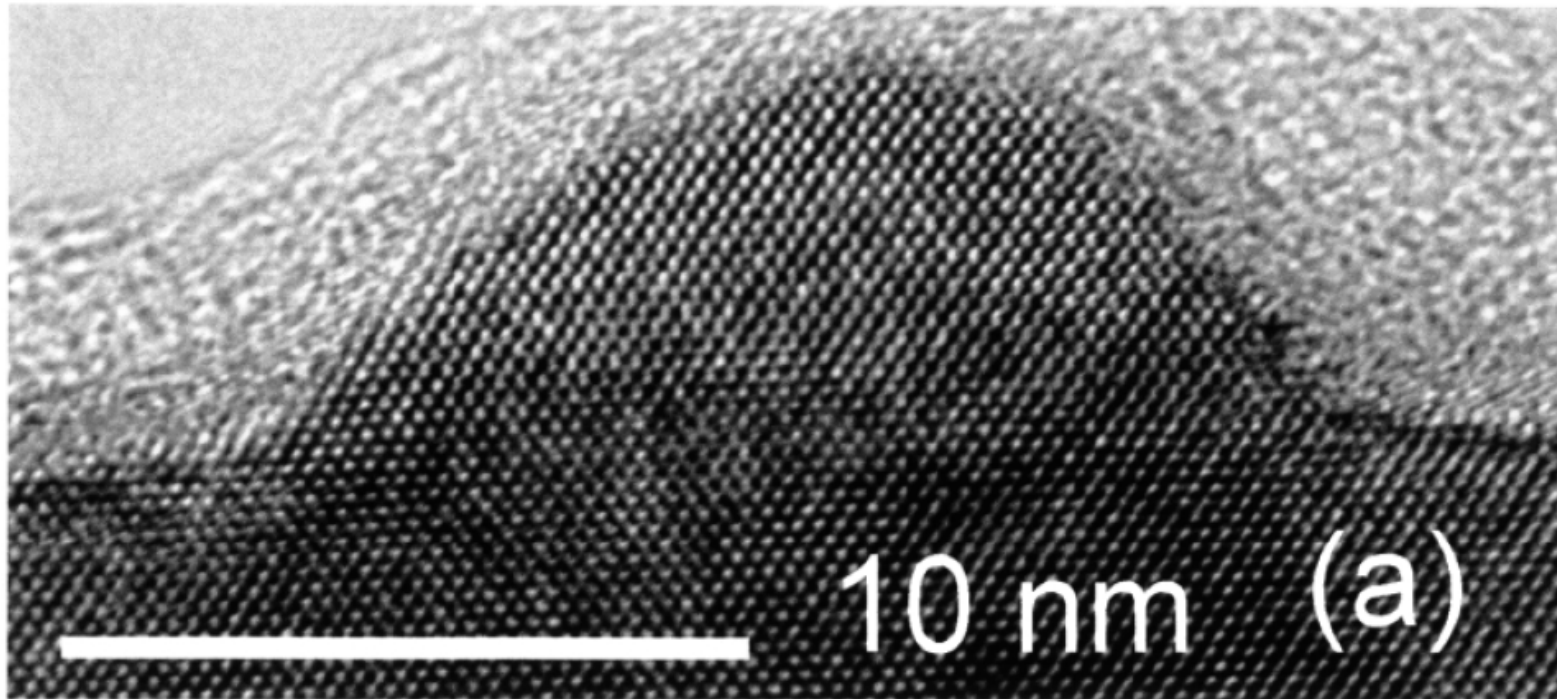
荒川 泰彦

東京大学

ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構長
生産技術研究所教授

量子ドット

- 数nm程度の寸法の3次元ナノ構造(30年前に荒川らにより提案)
- 量子ドットに閉じ込められた電子のエネルギー準位は離散化する。
- 電子のエネルギーは量子ドットのサイズで自由に換えられる。



* Reprinted with permission from P.W. Fry et.al. (2000), *Physical Review Letters*, vol.84, pp.733-736. Copyright 2000 by the American Physical Society.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.733> Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are for noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

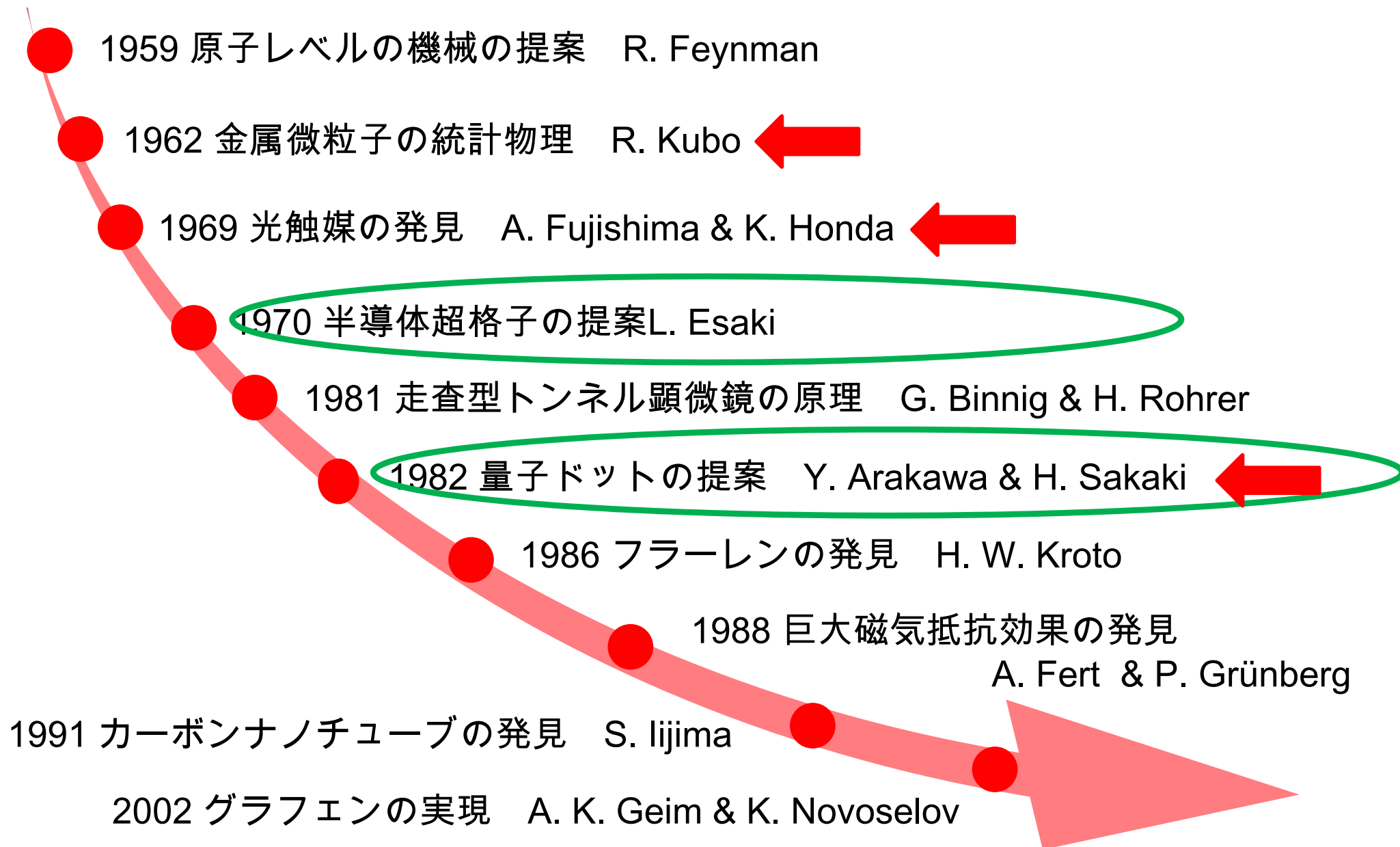
講演の内容

- 量子力学とナノテクノロジー
- 半導体とナノテクノロジー
- 量子ドット
- 量子ドットレーザー
- 量子ドット太陽電池
- まとめ

講演の内容

- 量子力学とナノテクノロジー
- 半導体とナノテクノロジー
- 量子ドット
- 量子ドットレーザー
- 量子ドット太陽電池
- まとめ

ナノ科学技術の先駆業績



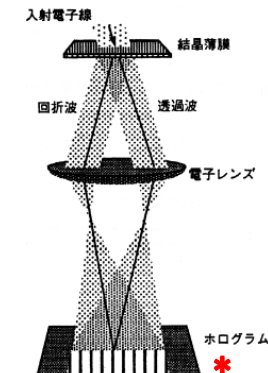
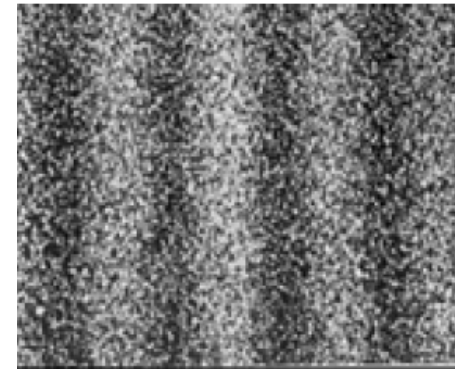
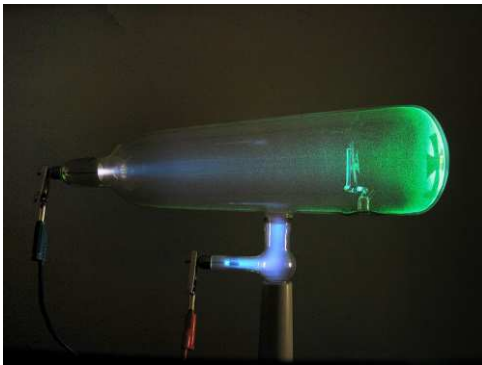
電子と量子力学

電子の二重性

粒子：電荷素量 “e”

電子波：波長、周波数（エネルギー）、位相

Image by D-Kuru, from
Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0 AT
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crookes_tube-in_use-lateral_view-standing_cross_prPNr%C2%B011.jpg



Tomomura, Hitachi

画像提供：[左]株式会社
日立製作所中央研究所
[右]科学技術振興機構
(JST)

ハイゼンベルグの不確定性原理

位置と運動量は同時に正確に測定することは不可能

エネルギーと時間も同時に正確に測定することは不可能

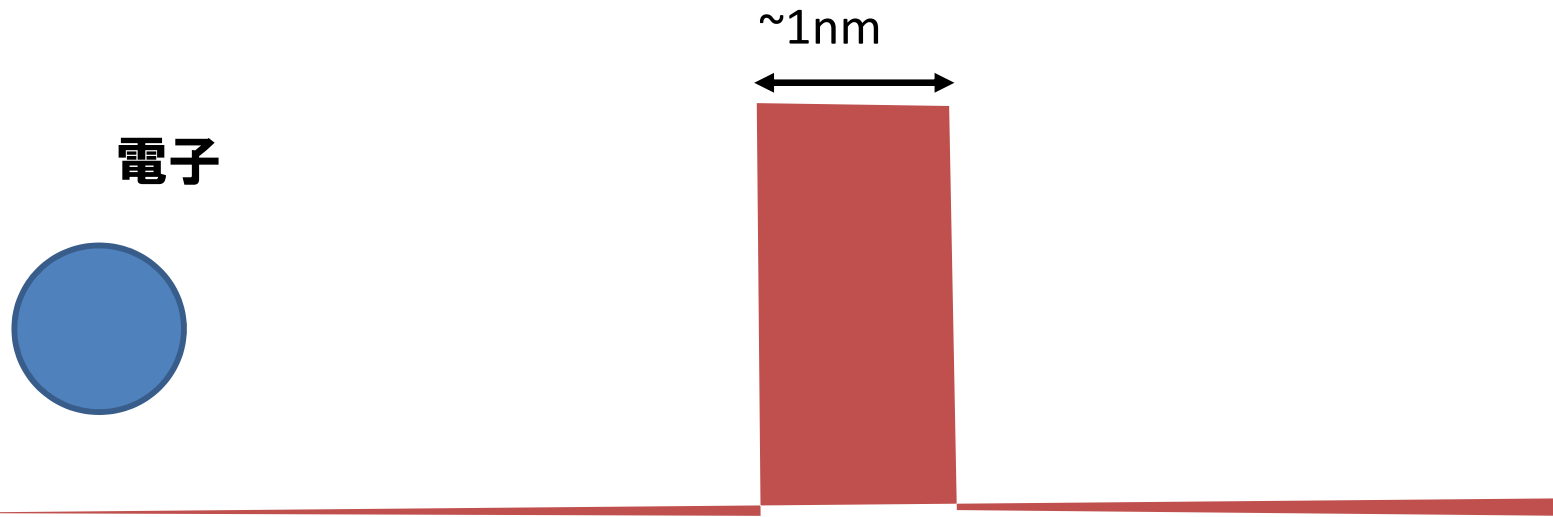
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

トンネル効果とエサキダイオード



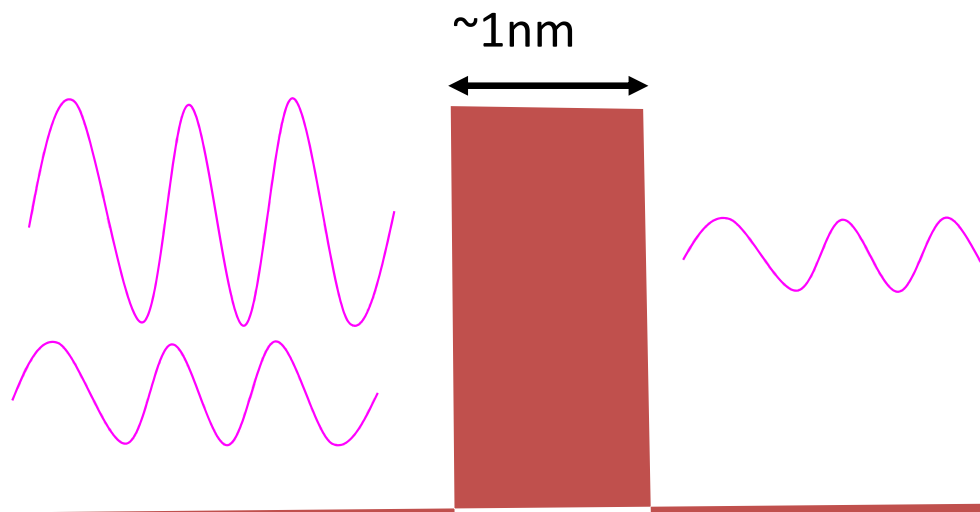
トンネル効果とエサキダイオード



トンネル効果とエサキダイオード

トンネル効果

電子



* Courtesy of Prof. Esaki

エサキダイオード: 技術がサイエンスを創る

THE PHYSICAL REVIEW

Second Series, Vol. 109, No. 2, Jan. 1958
LETTERS TO THE EDITOR

New Phenomenon in Narrow Germanium *p-n* Junctions

LEO ESAKI

Figures are reprinted with permission from Physical Review Letters, vol.109 (no.2): 603–604. Copyright 1958 by the American Physical Society.

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.220404>

Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are for noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

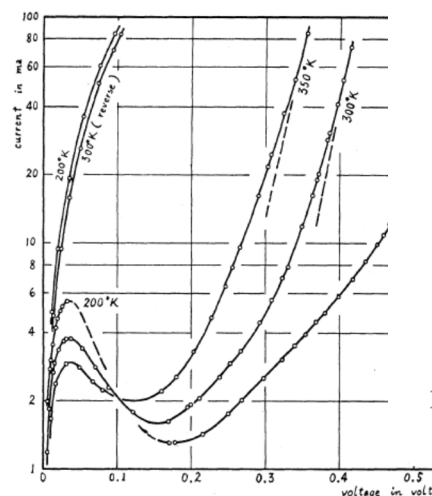


FIG. 1. Semilog plots of the measured current-voltage characteristic at 200°K, 300°K, and 350°K.

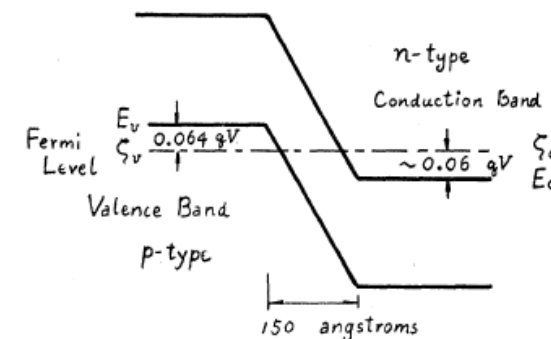


FIG. 2. Energy diagram of the *p-n* junction at 300°K and no bias voltage.

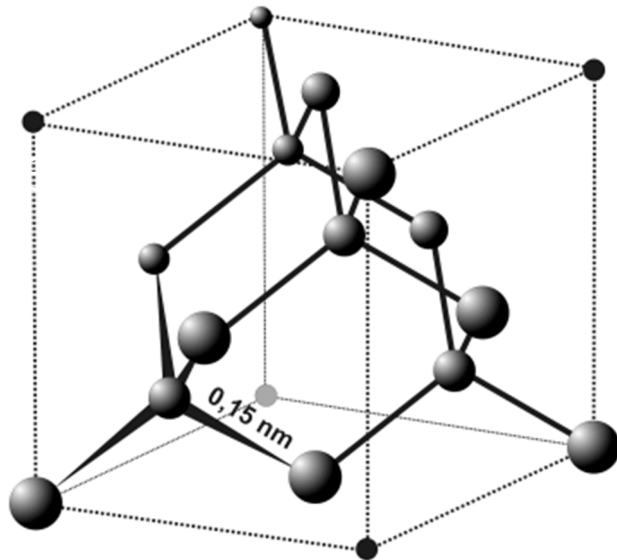
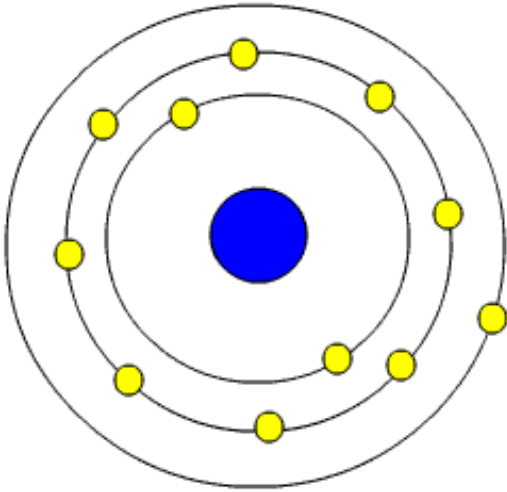
*

講演の内容



- 量子力学とナノテクノロジー
- 半導体とナノテクノロジー
- 量子ドット
- 量子ドットレーザー
- 量子ドット太陽電池
- まとめ

原子と結晶

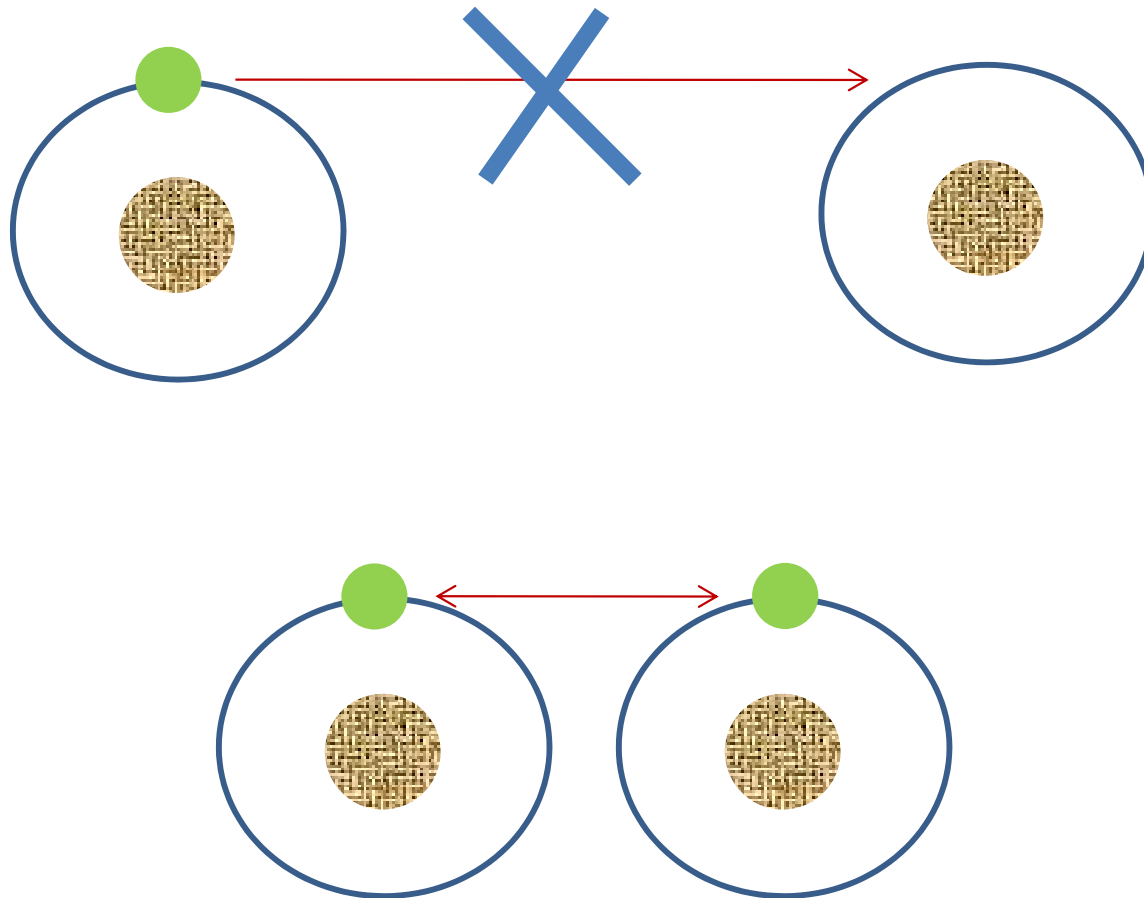


II b	III	IV	V	VI
		C	N	O
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg				

周期的に原子が配列する

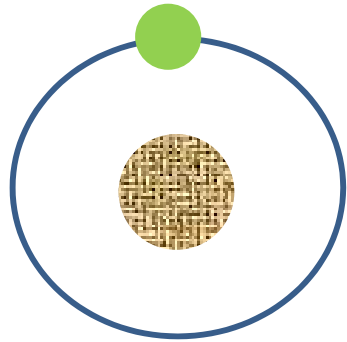
二つの原子の結合

トンネル効果



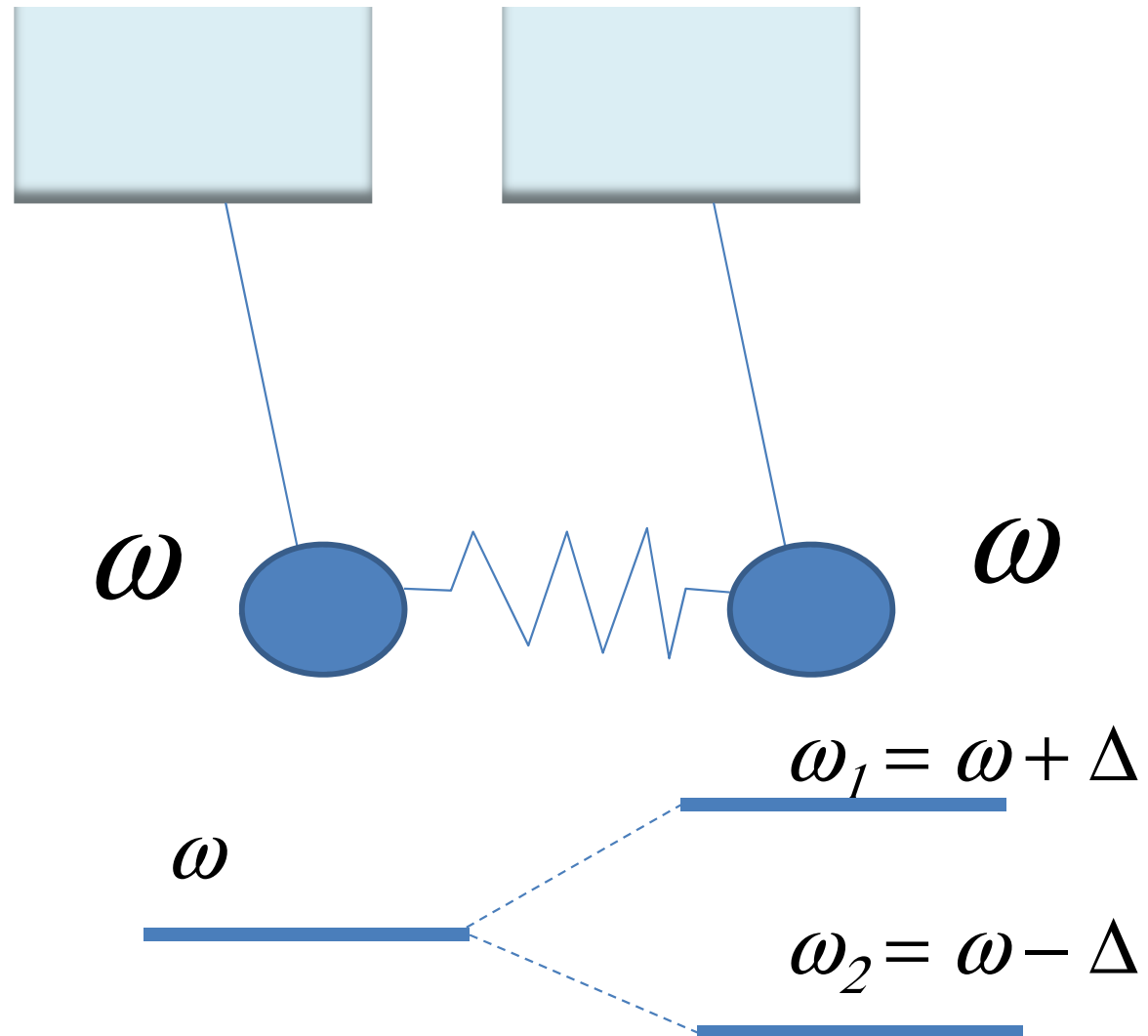
二つの原子の結合によるエネルギー分裂

トンネル効果

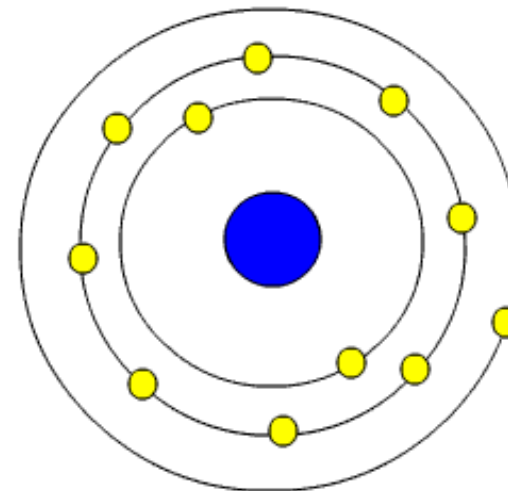
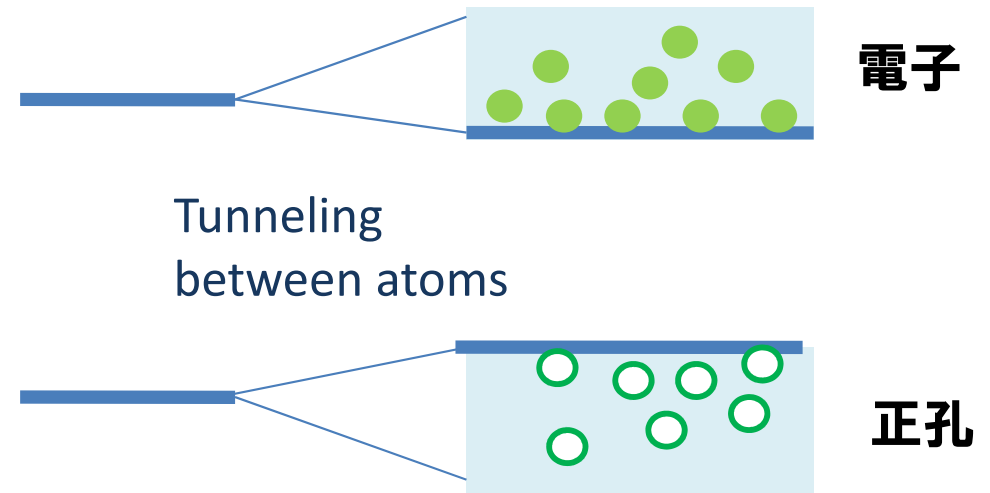
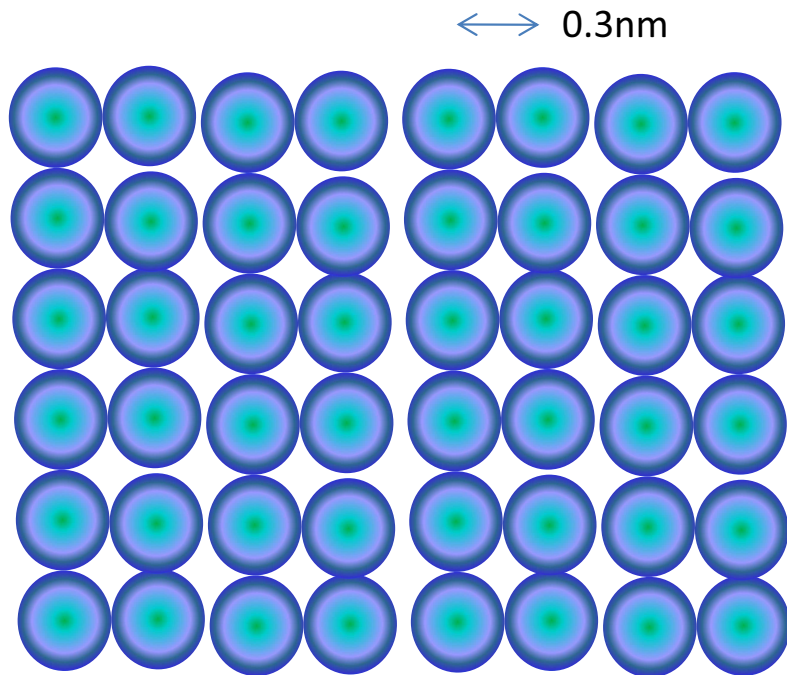


$$\omega_1 = \omega + \Delta$$

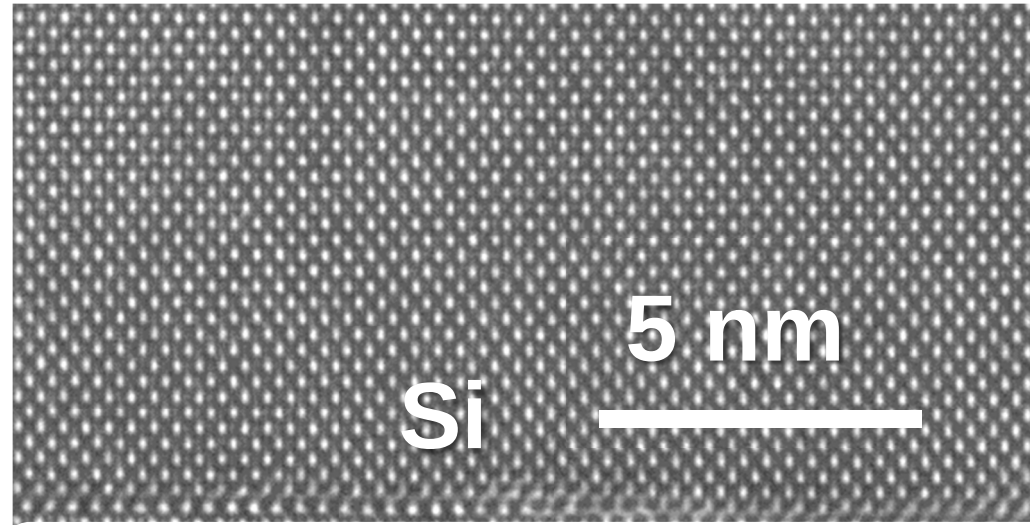
$$\omega_2 = \omega - \Delta$$



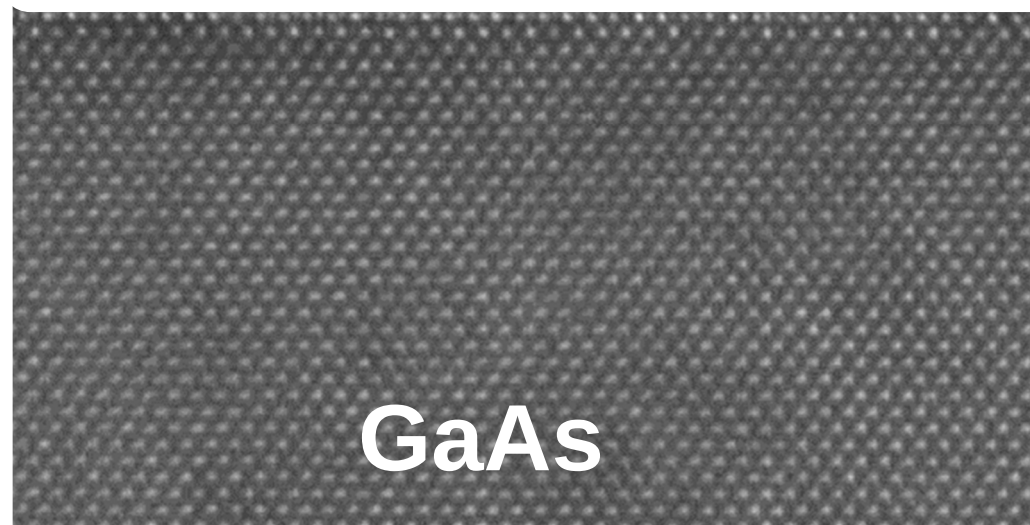
結晶のバンド構造



半導體



High Resolution Transmission Electron
Microscopy (TEM) image

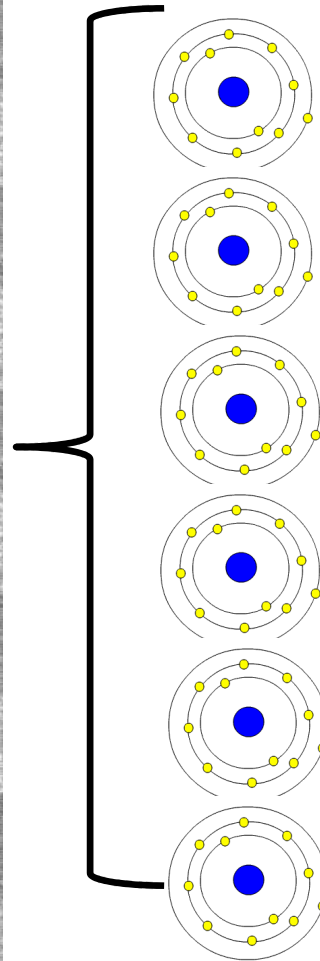
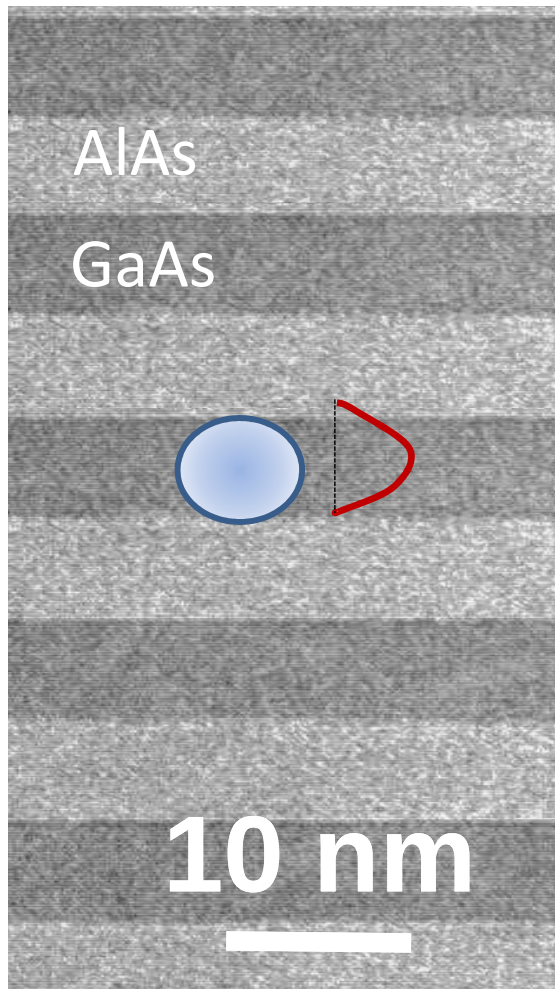


講演の内容



- 量子力学とナノテクノロジー
- 半導体とナノテクノロジー
- **量子ドット**
- 量子ドットレーザー
- 量子ドット太陽電池
- まとめ

超格子、量子井戸

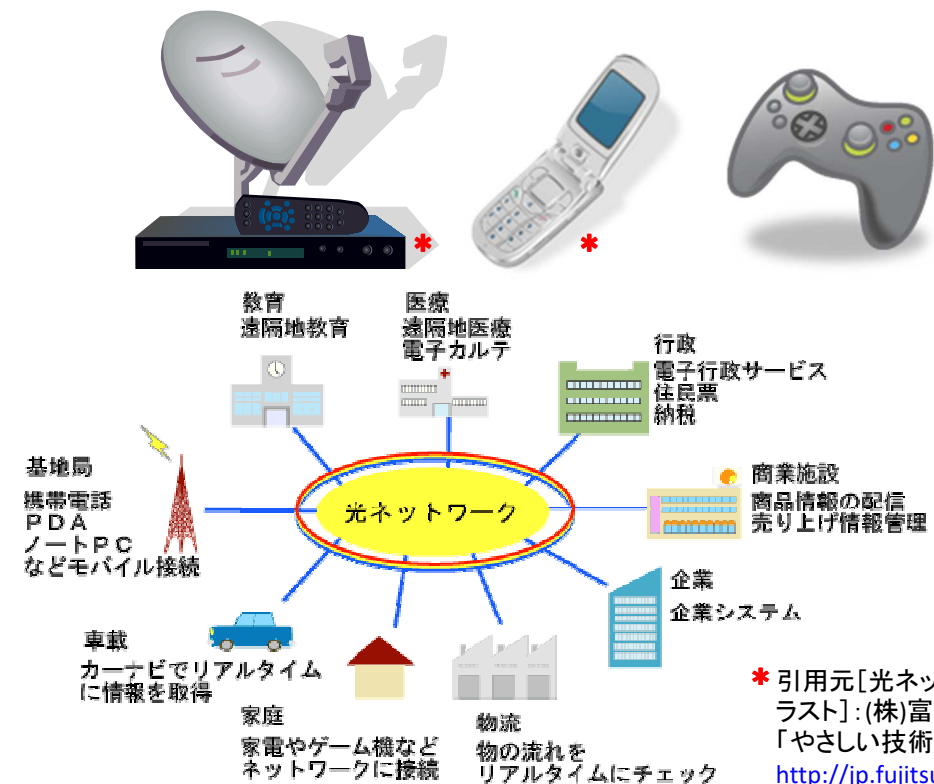


L. Esaki , R. Tsu

Super-lattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors

IBM J. Res. Develop. 14 : 61-5, 1970

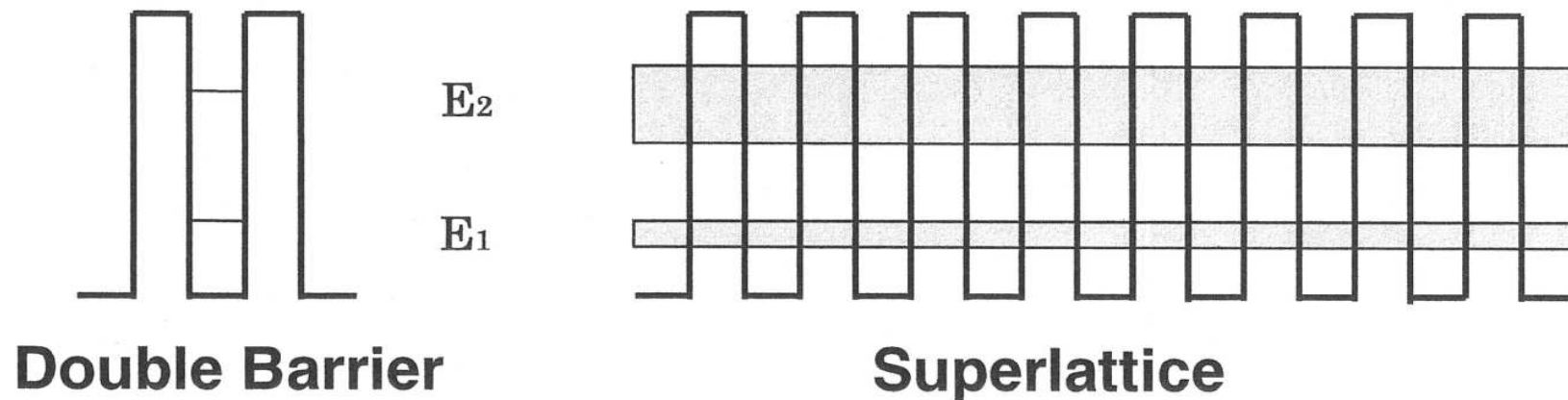
実用化製品: BSアンテナ、光通信用モジュール、
HEMT、赤外線検出器、量子井戸レーザ/変調器、...



* 引用元[光ネットワークのイラスト]: (株)富士通研究所
「やさしい技術講座」より
<http://jp.fujitsu.com/labs/techinfo/techguide/>

超格子

In 1969, **Esaki** and **Tsu** proposed **a semiconductor superlattice** implying **a double barrier structure** for resonant tunneling.



The proposal advocated preparing the periodic structure by applying the advanced growth technique of **MBE**, after designing the structure in accordance with **the principle of quantum theory** in such a way to exhibit **unprecedented desirable electronic properties**.

Esaki and Tsu



* Courtesy of Prof. Esaki

分子線エピタキシー装置(MBE)

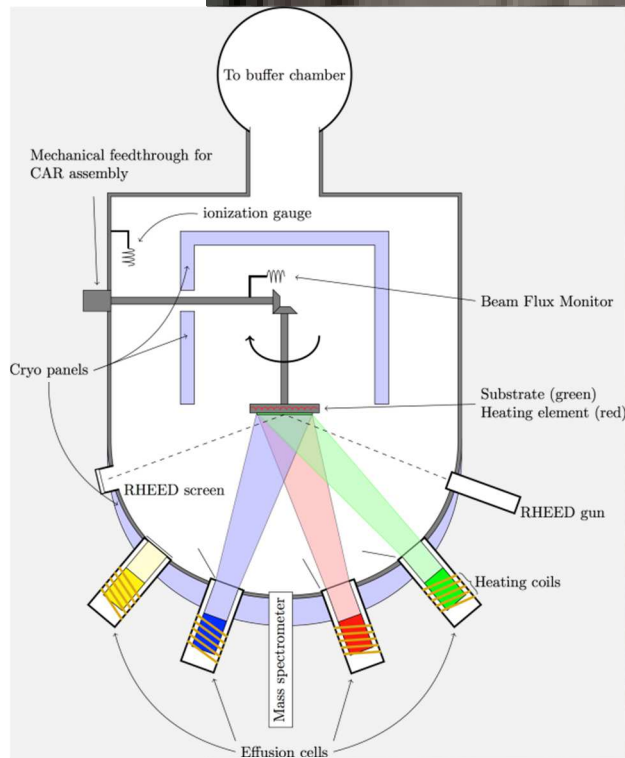
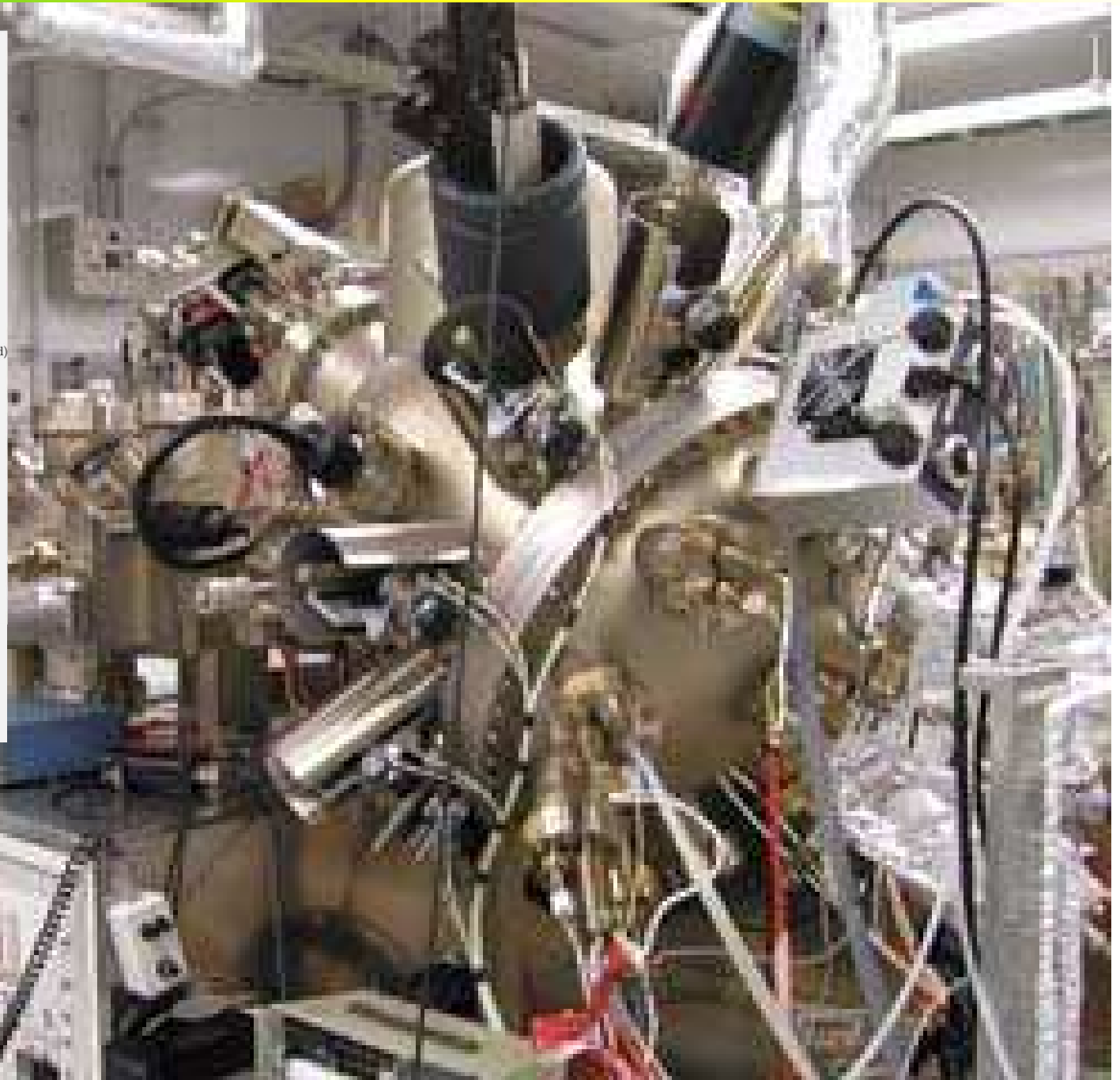


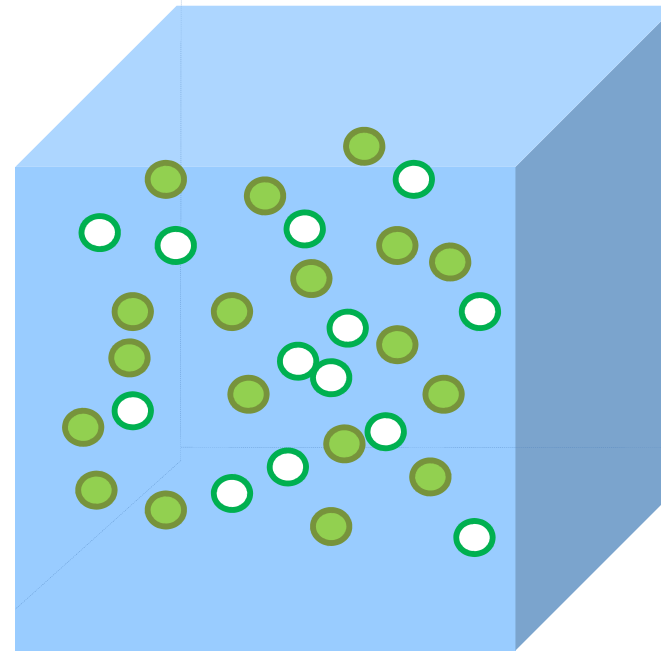
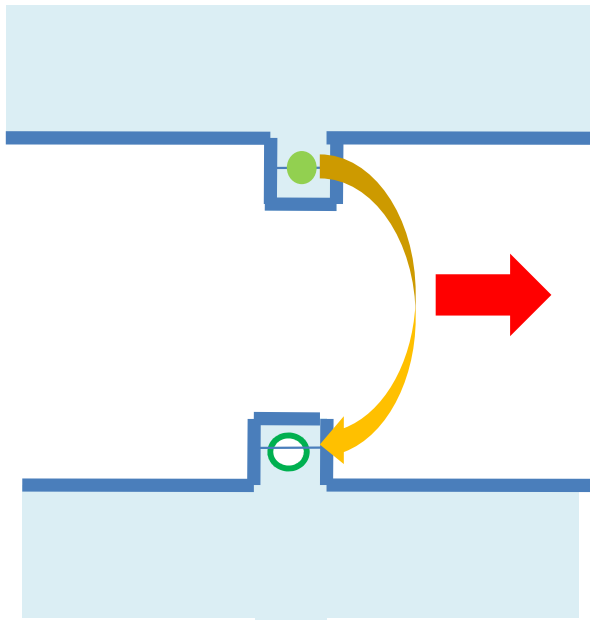
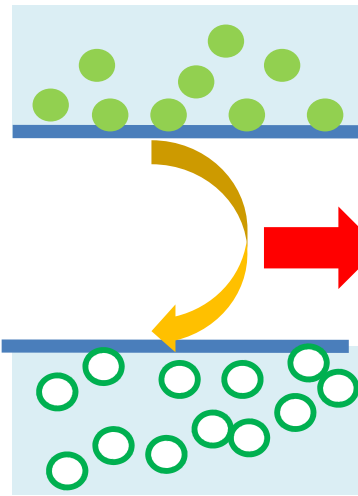
Image by Vegar Ottesen, from Wikimedia Commons
(2013/09/03)

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:MBE.png>

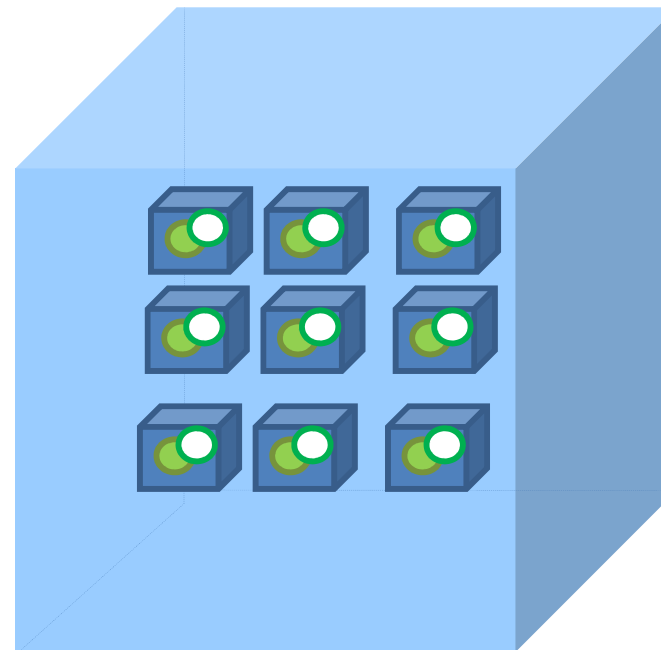
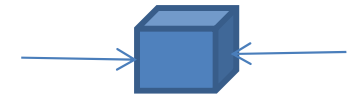
CC BY-SA 3.0



量子ドットの概念



~ 10nm

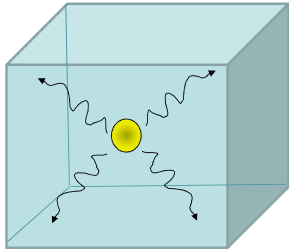


量子ドット

電子の運動の次元とナノ構造の次元

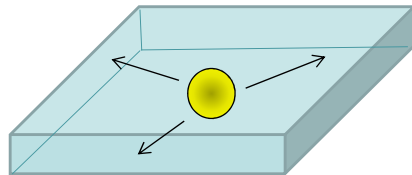
バルク半導体

電子は自由に飛び回っている



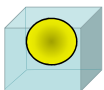
超格子/量子井戸(江崎,1969)

電子の自由度は2



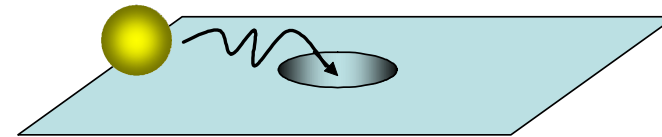
量子ドット(荒川,1982)

電子の状態を完全に制御する.

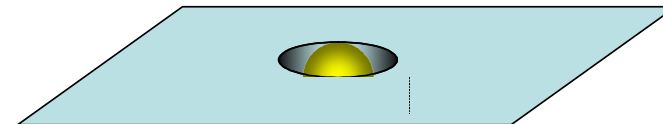


量子ドットは電子の落とし穴

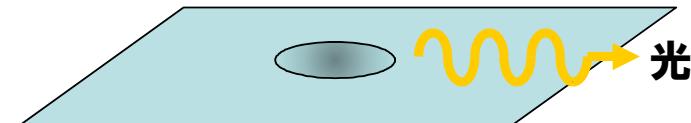
電子



ナノサイズの半導体



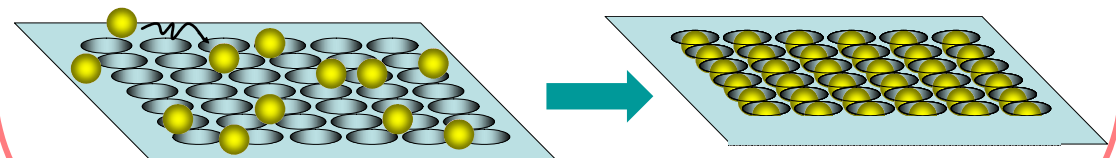
電子の落とし穴



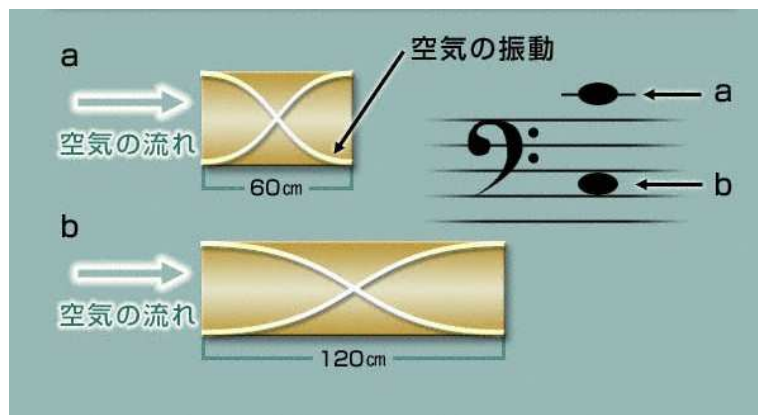
光

光を放出

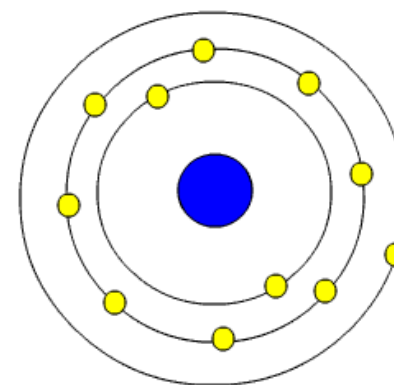
量子ドットは多数の電子のエネルギーを揃えることができる..



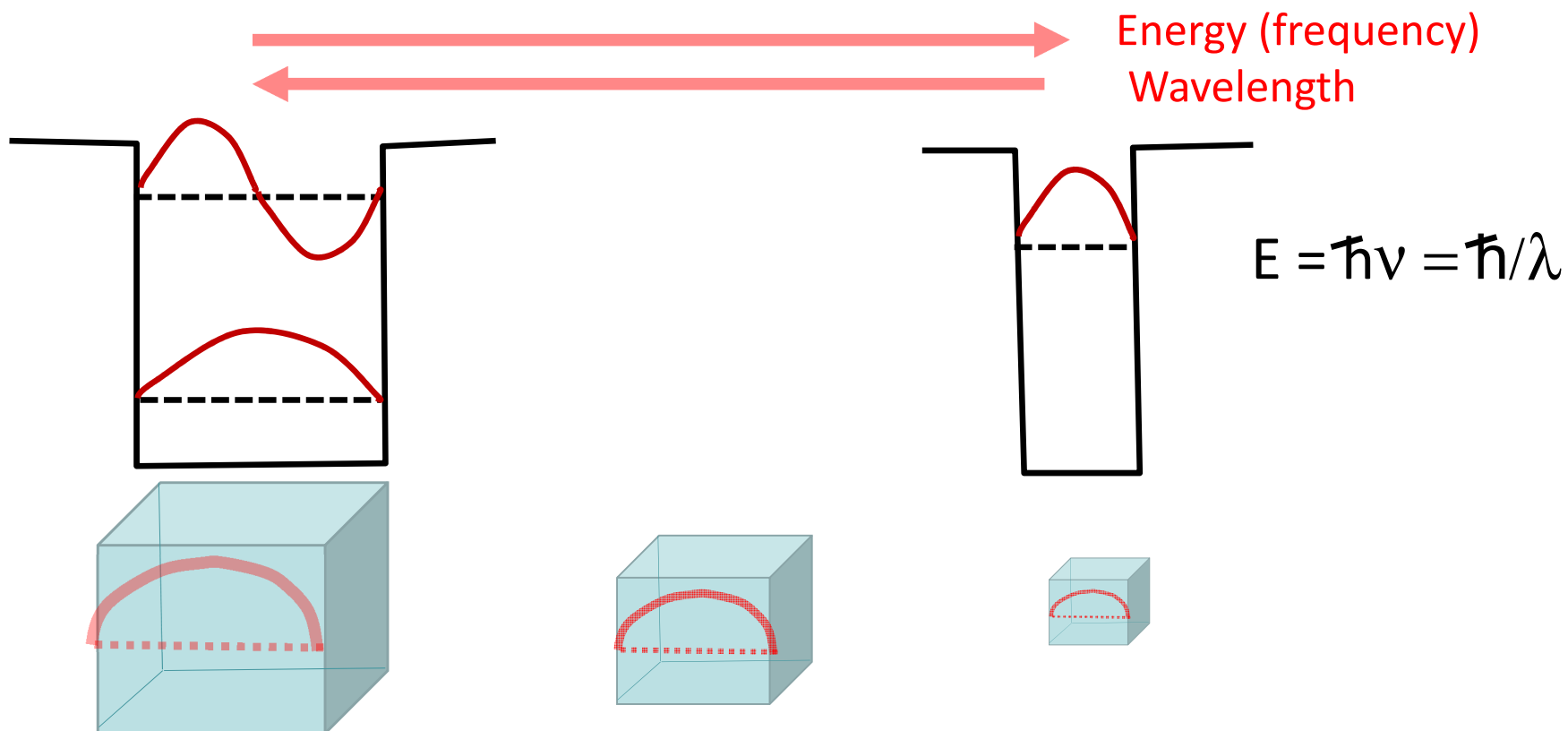
量子ドットの寸法と形状により電子の性質が変化する



* 出典: IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



artificial atom



量子ドットの提案(1982年)

Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current

Y. Arakawa and H. Sakaki

Applied Physics Letters, vol.40(no.11, June 1982):939-941

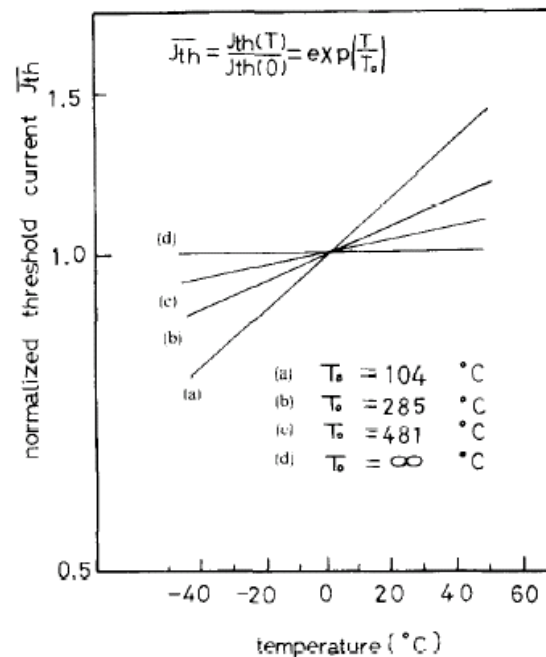
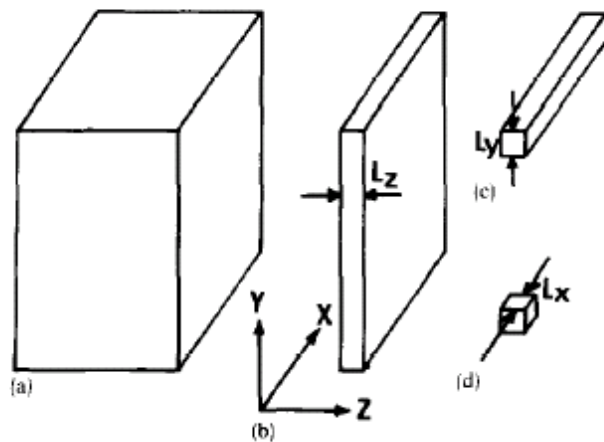


FIG. 2. Numerical example of threshold current J_{th} calculated by the model of Lasher and Stern for conventional lasers (a) and well lasers for (b) 1D-, (c) 2D-, and (d) 3D-QW structures. J_{th} is normalized by J_{th} at 0 °C.

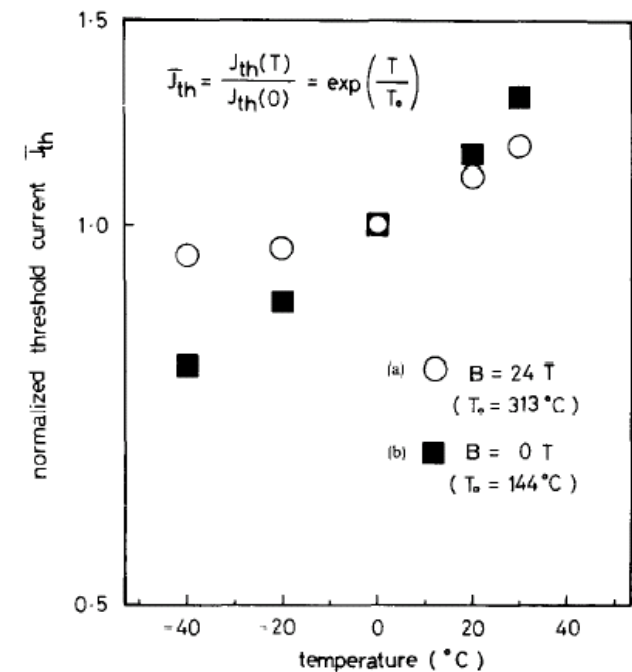


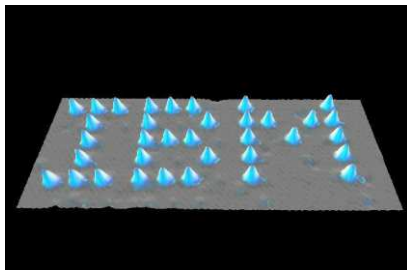
FIG. 3. Temperature dependence of threshold current J_{th} with and without magnetic field B (24 T). J_{th} is normalized by J_{th} at 0 °C, which is 52 mA at $B = 0$ and 54 mA at $B = 24$ T.

2,300回以上の引用

如何にして量子ドットをつくるか

●ボトムアップ法

STMによる積み上げ



* Image by D.M. Eigler, IBM Corporation

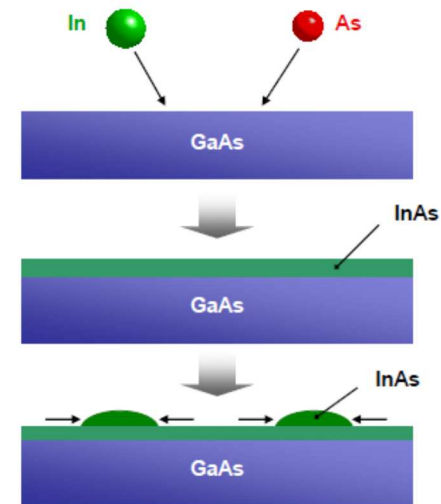
Xe atom on Ni surface

●トップダウン法



●自己組織化法

Highly-strained epitaxial growth



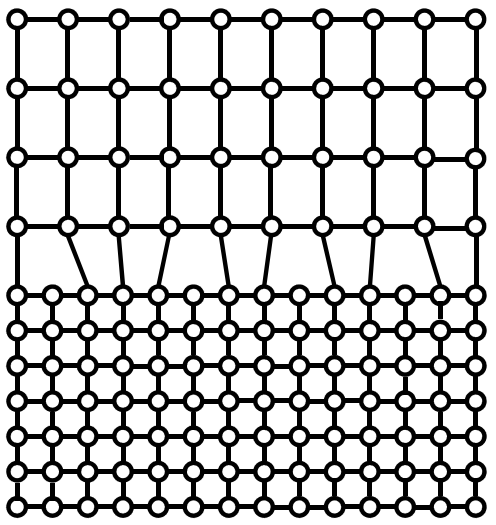
* 画像提供: 株式会社QDレーザ

The first report

Goldstein et al, CNET 1985

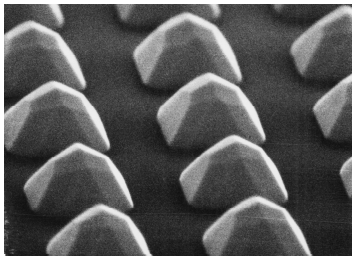
量子ドットの自己組織化の原理

dislocations



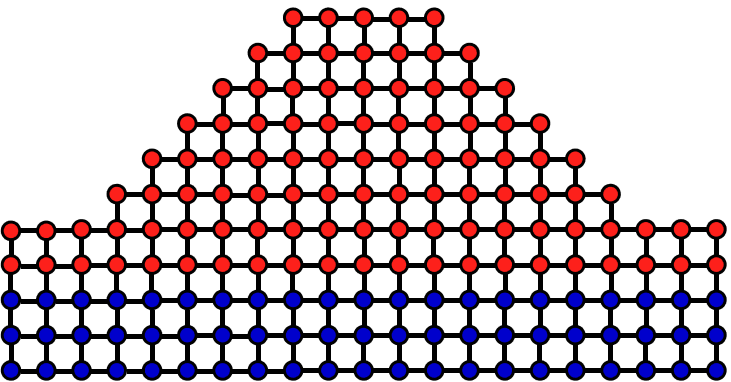
missing lattice planes

creation of unwanted defects



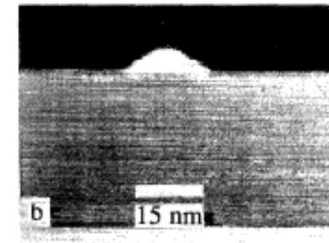
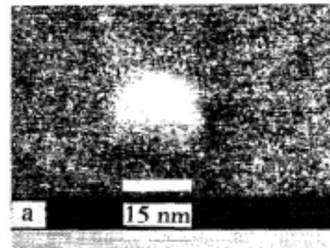
■ Selective growth (1990)
Y. Nagamune, YA

formation of islands



reorganisation of surface adatoms:
Stranski-Kratanow epitaxy mode

coherent islands: nodefects
self-assembly



■ MOCVD SK QDs (1994) Oshinovo, YA

Photos reprinted with permission from J. Oshinowo, M. Nishioka, S. Ishida, and Y. Arakawa (1994) [Highly uniform InGaAs/GaAs quantum dots \(~15 nm\) by metalorganic chemical vapor deposition](#), Applied Physics Letters, vol.65 (no.11):1421-1423, p.1422 Fig.1(a) and (b). Copyright 1994, AIP Publishing LLC. This article may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the author and the AIP Publishing LLC.

講演の内容

■ 量子力学とナノテクノロジー

■ 半導体とナノテクノロジー

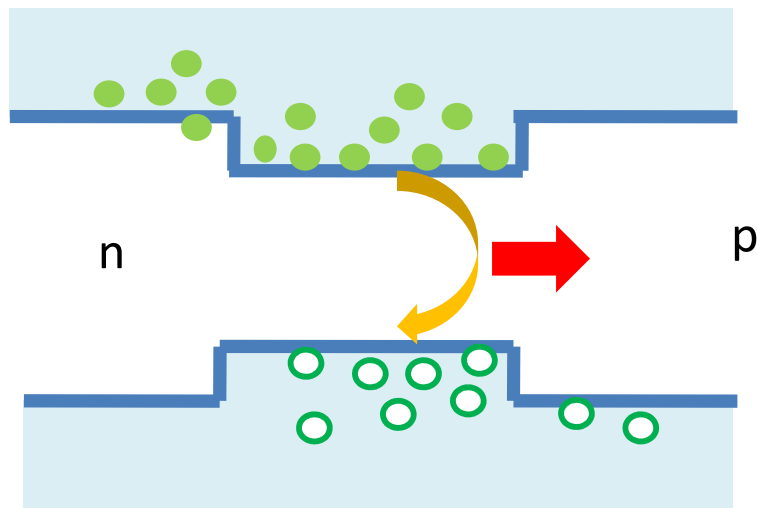
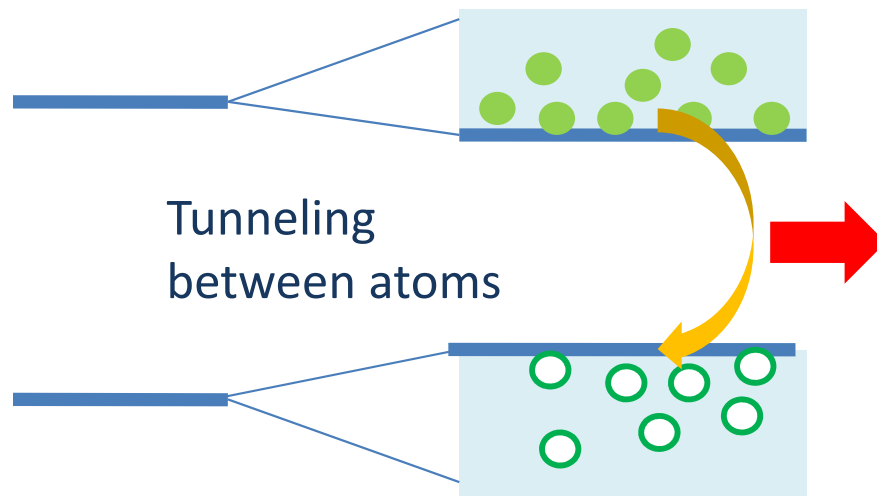
■ 量子ドット

■ **量子ドットレーザー**

■ 量子ドット太陽電池

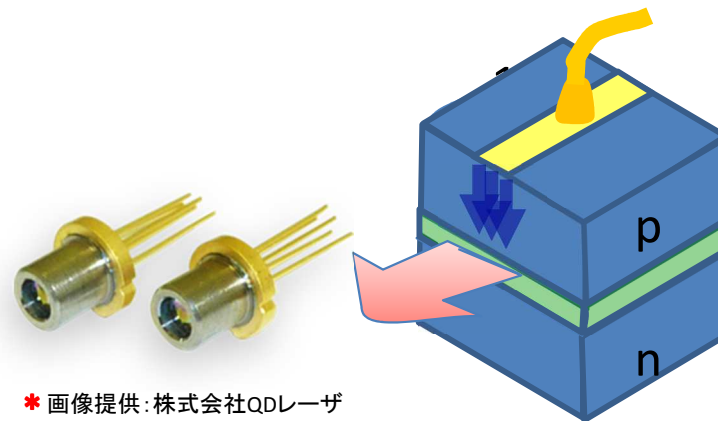
■ まとめ

半導体レーザー



Double heterostructure (DH)

- 1962 GaAs homo laser at LT
- 1970 RT operation ($0.8\mu\text{m}$)
 - Alferov, Hayashi, Panish,...
 - GaAs DH lasers



* 画像提供: 株式会社QDレーザ

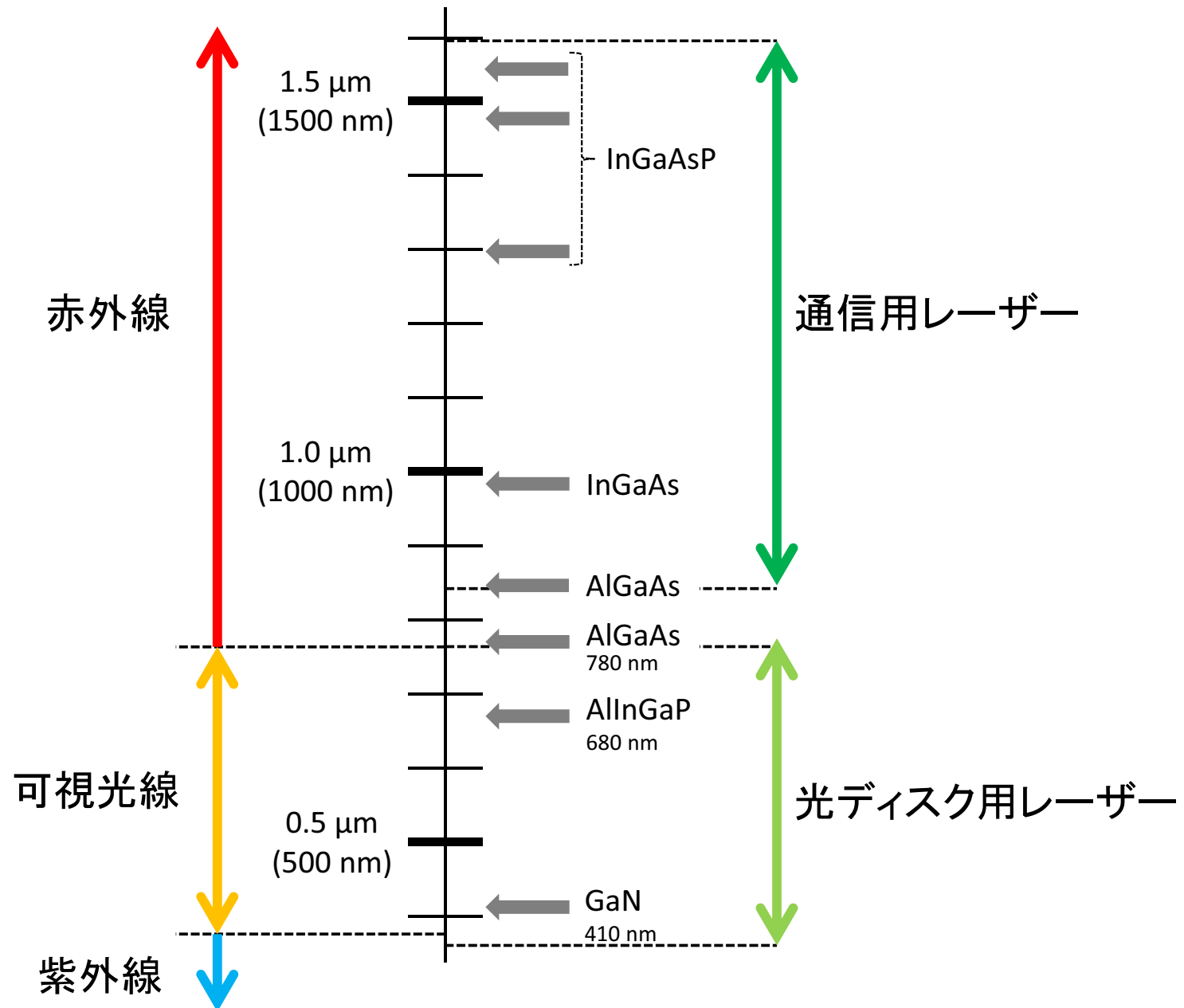


* © Alferov Foundation
- www.alferov-fond.ru -
www.alferov.it

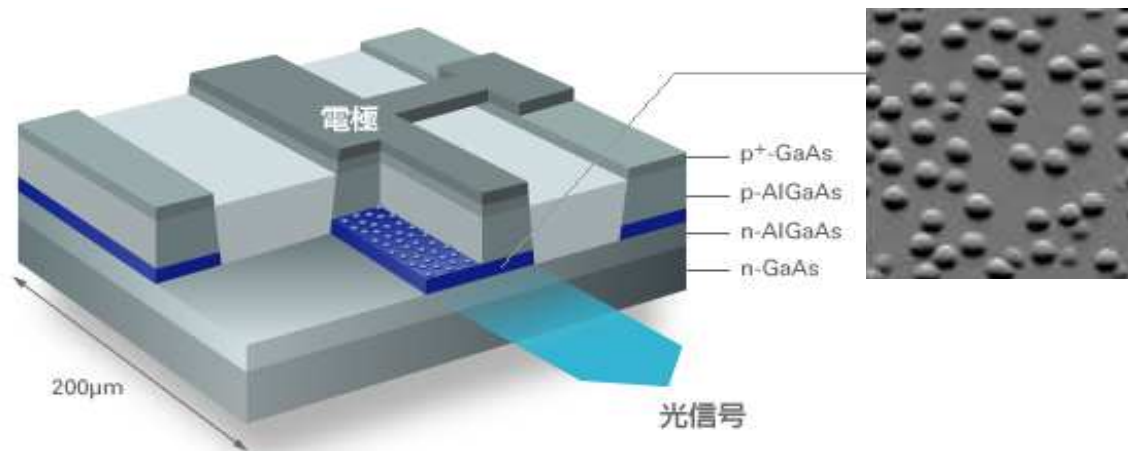


* 写真提供: 応用物理学会
(JSAP)

半導体レーザー

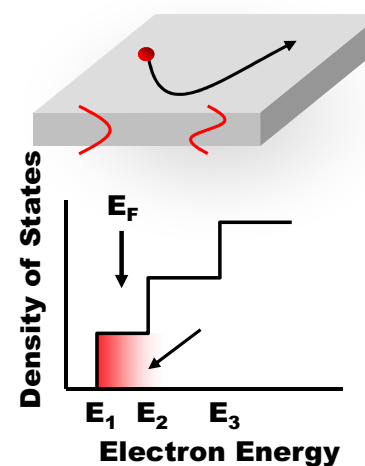


量子ドットレーザー



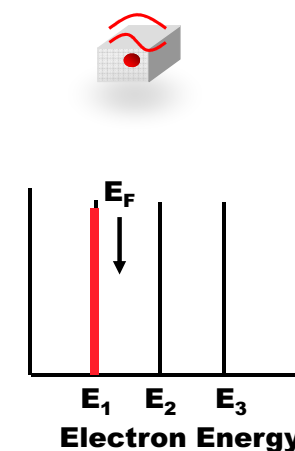
* 画像提供: 株式会社QDレーザ

量子井戸

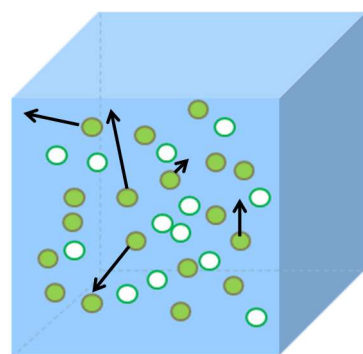


* 画像提供: 株式会社QDレーザ

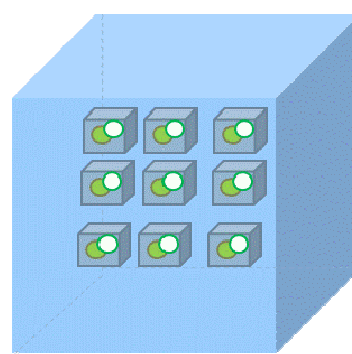
量子ドット



* 画像提供: 株式会社QDレーザ



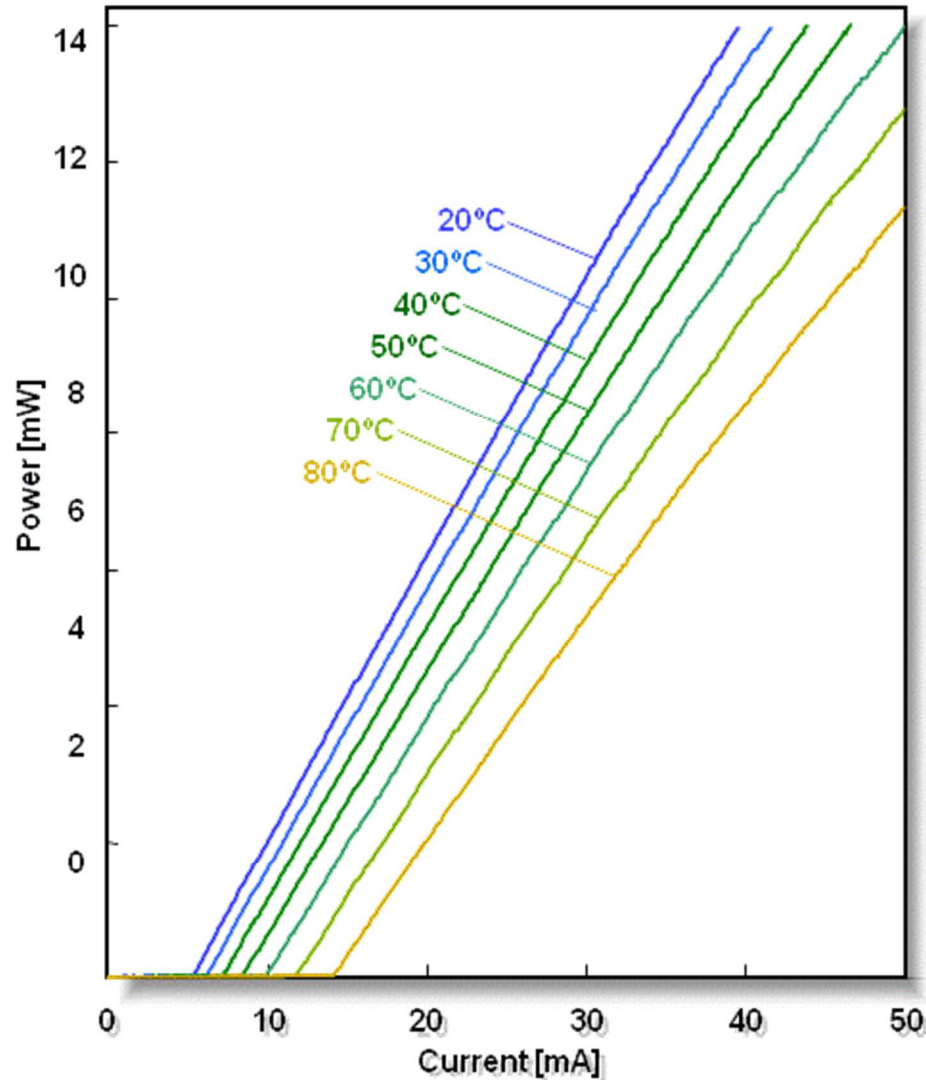
Random energy distribution of electrons and holes



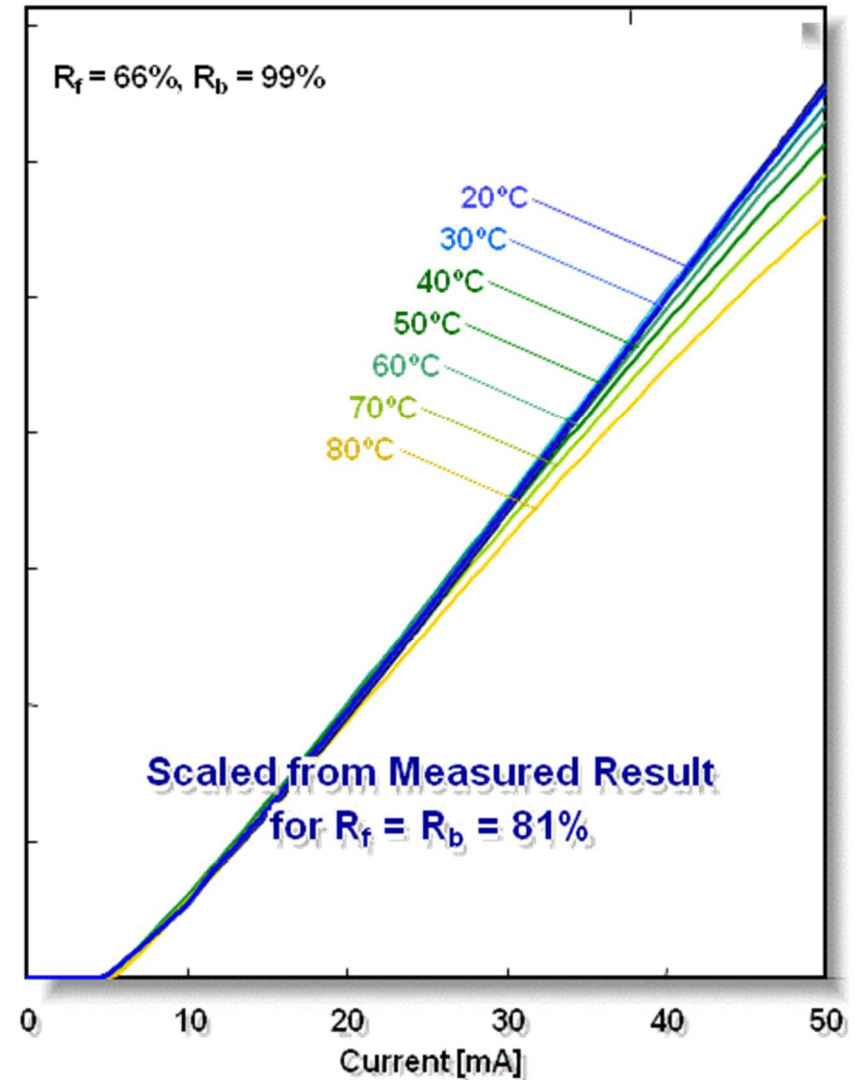
Controlled energy of electrons and holes

超温度安定レーザーの実現(新しい価値)

量子井戸レーザー



量子ドットレーザー



東大、富士通の共同研究成果 (2004)

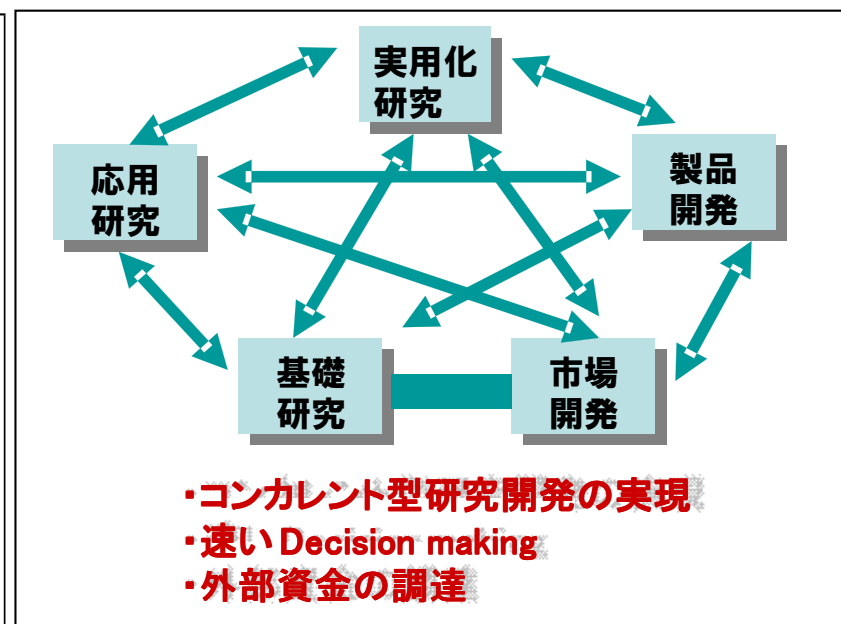
(株)QDレーザ発足：イノベーション創出に向けて

会社名 株式会社QDレーザ(QD Laser, Inc.)

設立 2006年4月

代表取締役 菅原 充

株主 富士通株式会社（コーポレートファンド）、三井物産株式会社（三井物産グローバル投資株式会社）、みずほキャピタル株式会社



四半世紀

提案

温度安定レーザ

QDレーザ発足

市場化

(株)QDレーザ発足：イノベーション創出に向けて

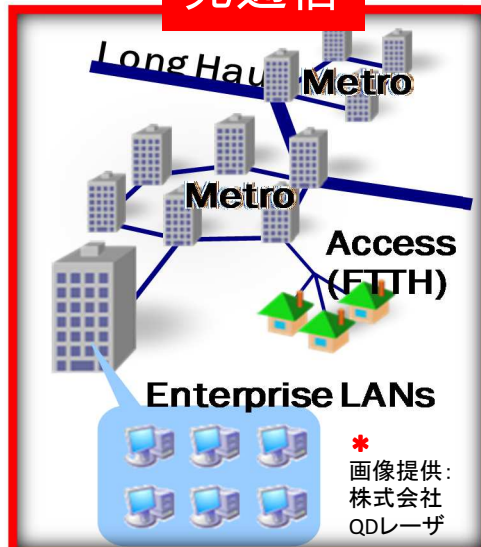
会社名 株式会社QDレーザ(QD Laser, Inc.)

設立 2006年4月

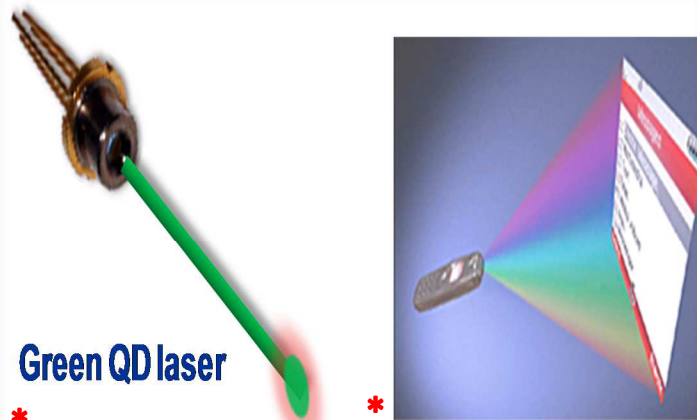
代表取締役 菅原 充

株主 富士通株式会社（コーポレートファンド）、三井物産株式会社（三井物産グローバル投資株式会社）、みずほキャピタル株式会社

光通信



民生用エレクトロニクス



光とLSIの融合



四半世紀

提案

82

温度安定レーザ

04

QDレーザ発足

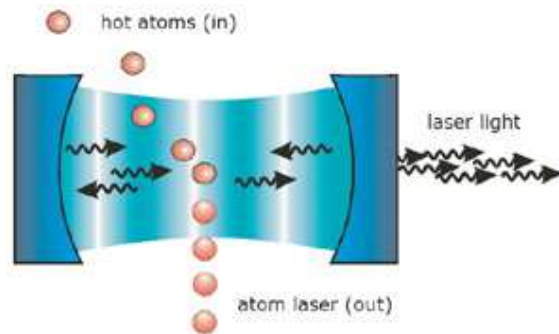
06

市場化

10

単一量子ドット発光素子への展開

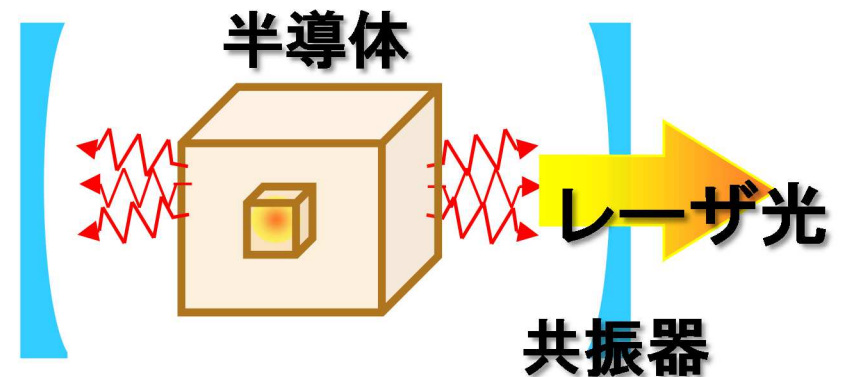
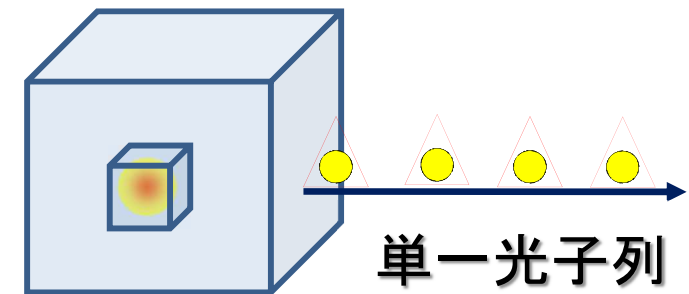
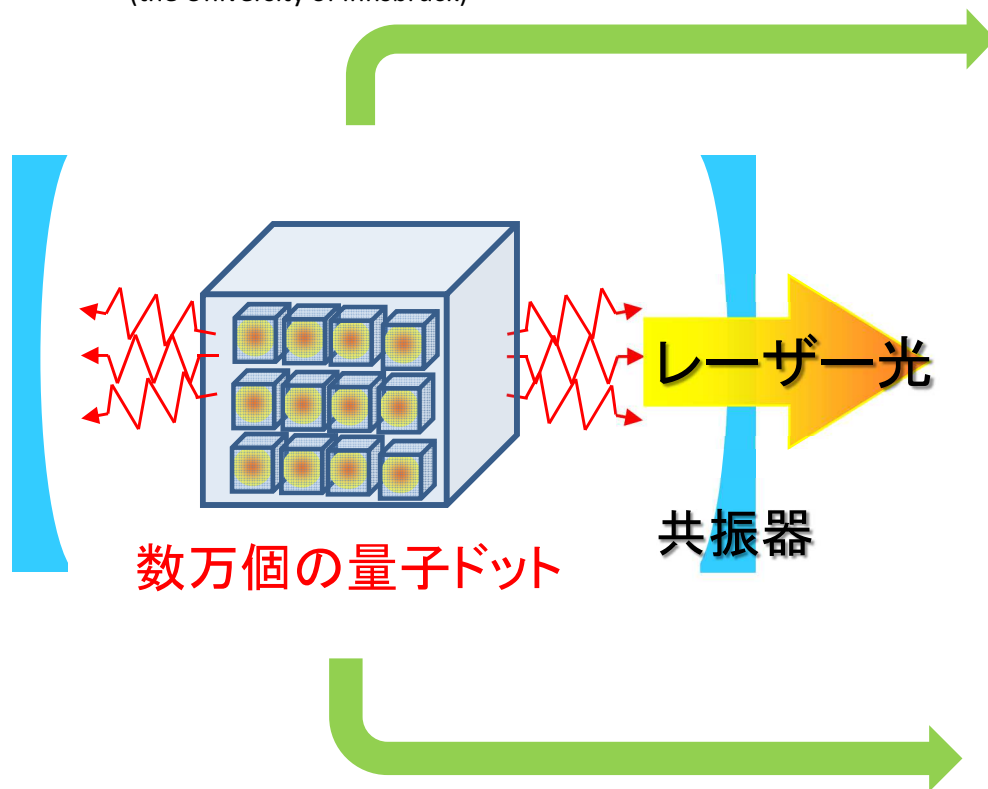
単一原子レーザー



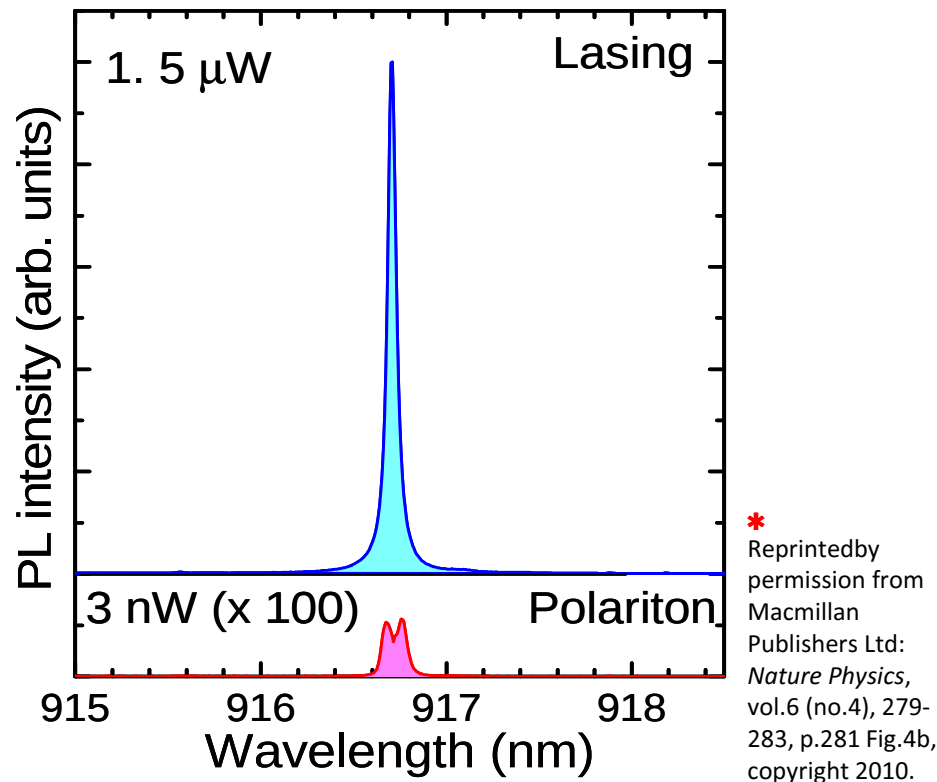
1990's Numerical simulations of one-atom lasers
2003 Experimental realization of One-atom laser: Nature **425**, 268

Trapping a gas atom in a large vacant cavity

* Courtesy of Prof. Helmut Ritsch
(the University of Innsbruck)



単一人工原子レーザーの実現



Laser oscillation in a strongly coupled single-quantum-dot-nanocavity system

M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota and Y. Arakawa

Nature Physics, vol.6 (no.4, Apr. 2010):279-283

著作権の都合上
ここに挿入されていた画像を
削除しました

日経産業新聞
2010年2月22日10面
「レーザー光半導体素子
人工原子1個で
東大、光LSI実現に道」

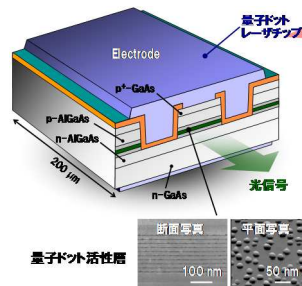
量子ドットが拓くイノベーション

グリーンイノベーションを牽引する量子ドット

通信用
量子ドットレーザー

民生用
量子ドットレーザー

**未来
量子ドット素子**



* 画像提供:株式会社QDレーザ

1.55 μ m量子ドットレーザー

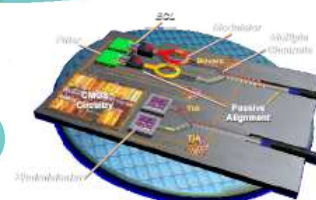
GaN系青緑色 量子ドットレーザー

量子ドット 光増幅器

シリコン融合 量子ドットレーザー

SHG緑色量子ドットレーザー

1.3 μ m量子ドットレーザー



* Courtesy Intel Corp.

量子ドットエネルギー変換素子

医療用マーカ

量子もつれ
光子発生器

単一量子ドット レーザー

単一光子
発生器



* Reprinted with permission from P.W. Fry et.al. (2000), *Physical Review Letters*, vol.84, pp.733-736. Copyright 2000 by the American Physical Society.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.733>

Quantum dots

1982 2010

2015

2020

year

講演の内容



- 量子力学とナノテクノロジー

- 半導体とナノテクノロジー

- 量子ドット

- 量子ドットレーザー

- **量子ドット太陽電池**

- まとめ

太陽光パネル



量子ドット太陽電池の挑戦

脱コスト競争新市場の開拓

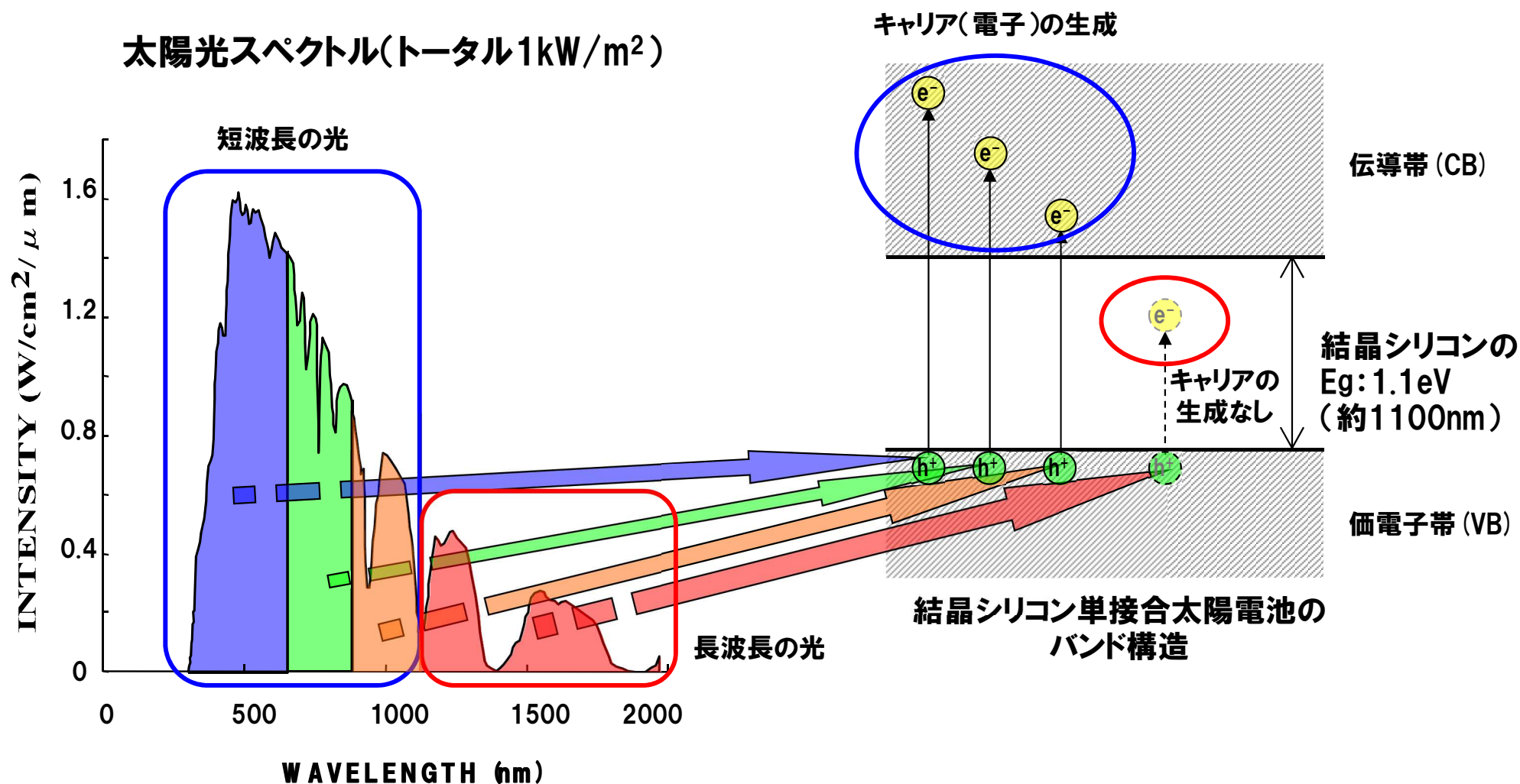
一世帯分の発電をテラスで

ガソリンを一滴も使わない自動車



変換効率の限界を決めている要因

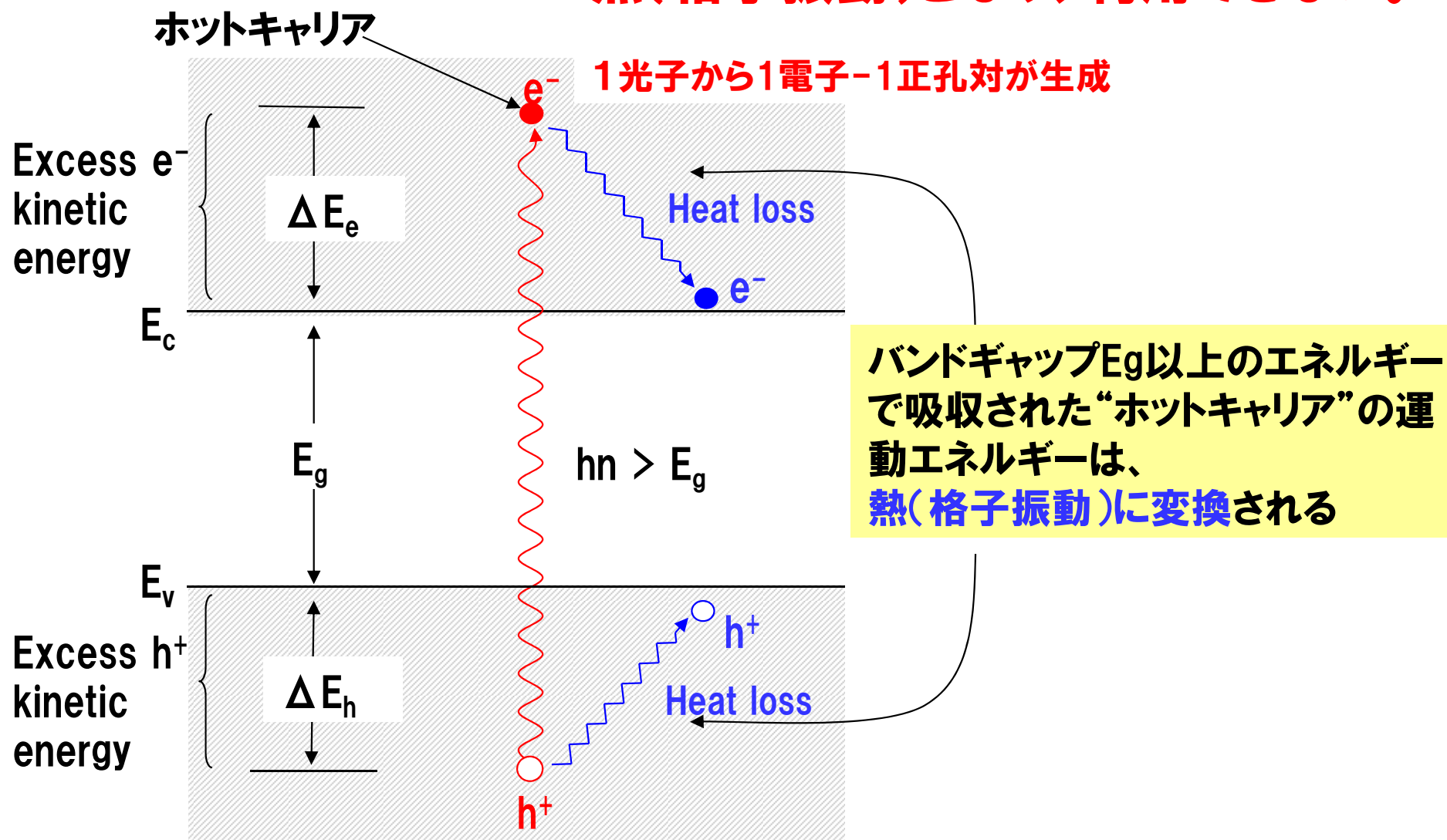
①バンドギャップより小さいエネルギーの光は吸収されない。



変換効率の限界を決めている要因

②バンドギャップを超える余剰のエネルギーは

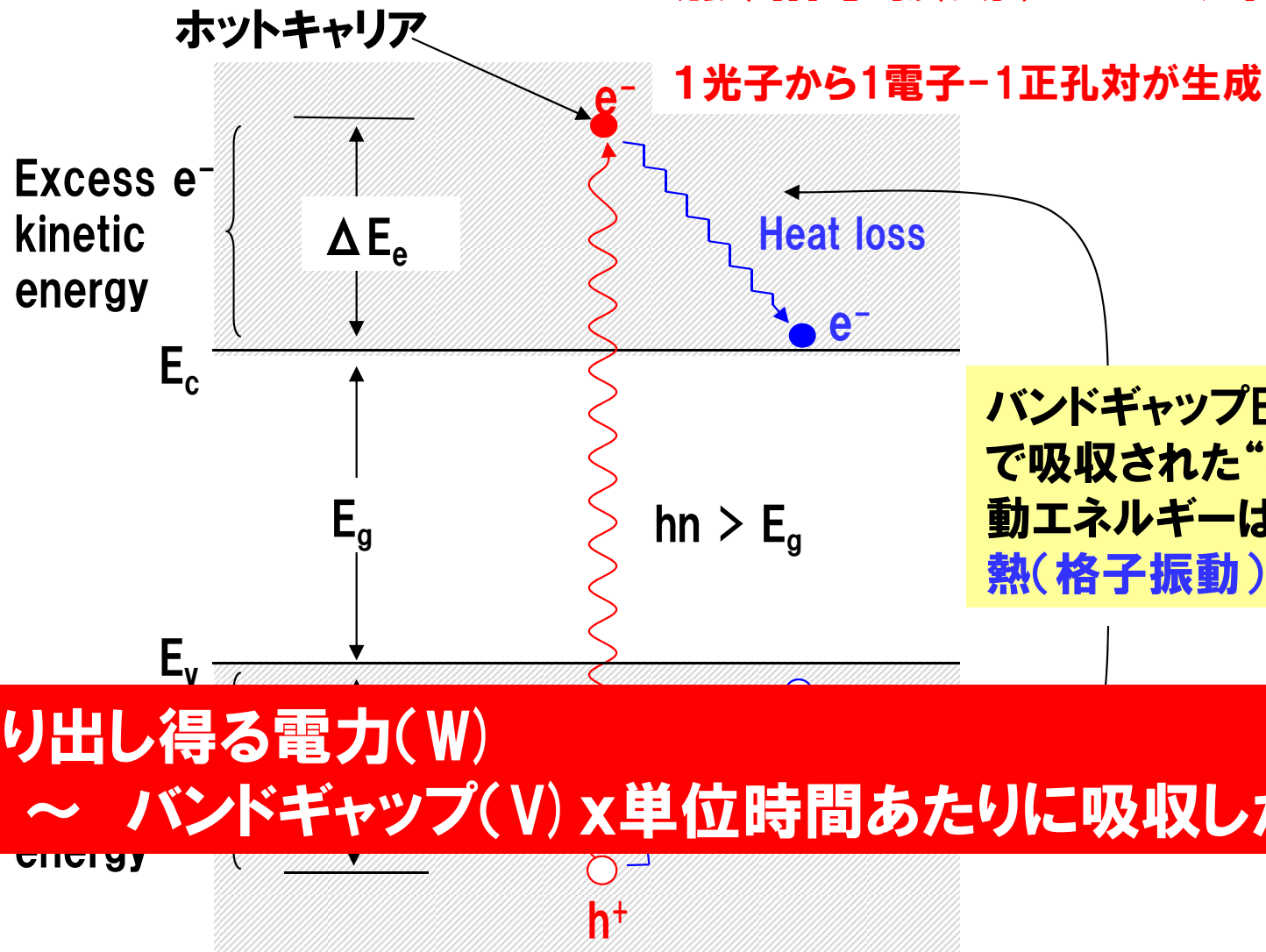
熱(格子振動)となり、利用できない。



変換効率の限界を決めている要因

②バンドギャップを超える余剰のエネルギーは

熱(格子振動)となり、利用できない。



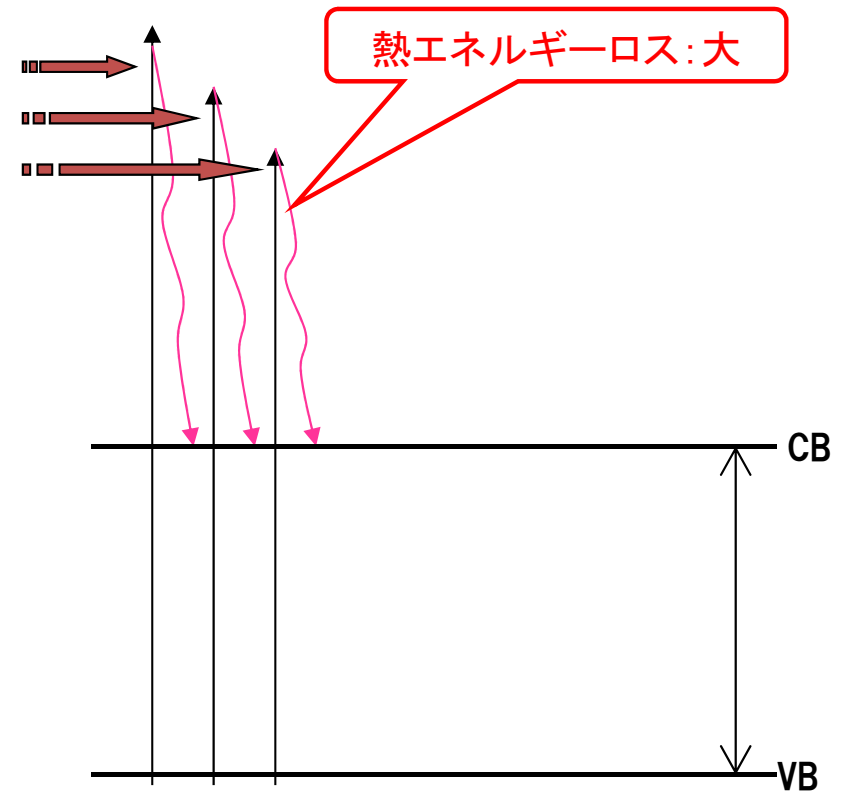
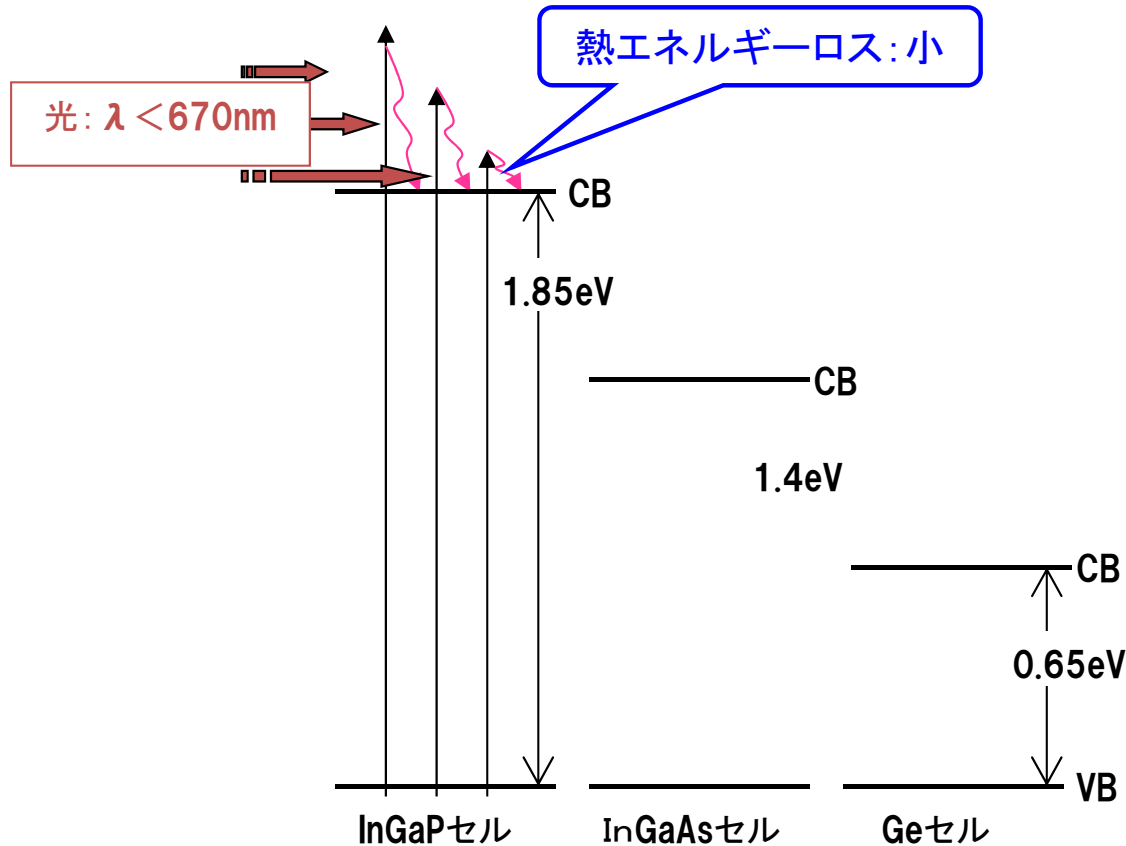
取り出し得る電力(W)

～ バンドギャップ(V) x 単位時間あたりに吸収した電子数(I)

多接合型の導入

多接合型は、高い効率を得られる。

- ① 低エネルギー(長波長)の光子も吸収・利用
- ② 熱(格子振動)へのロスを最小限に抑制



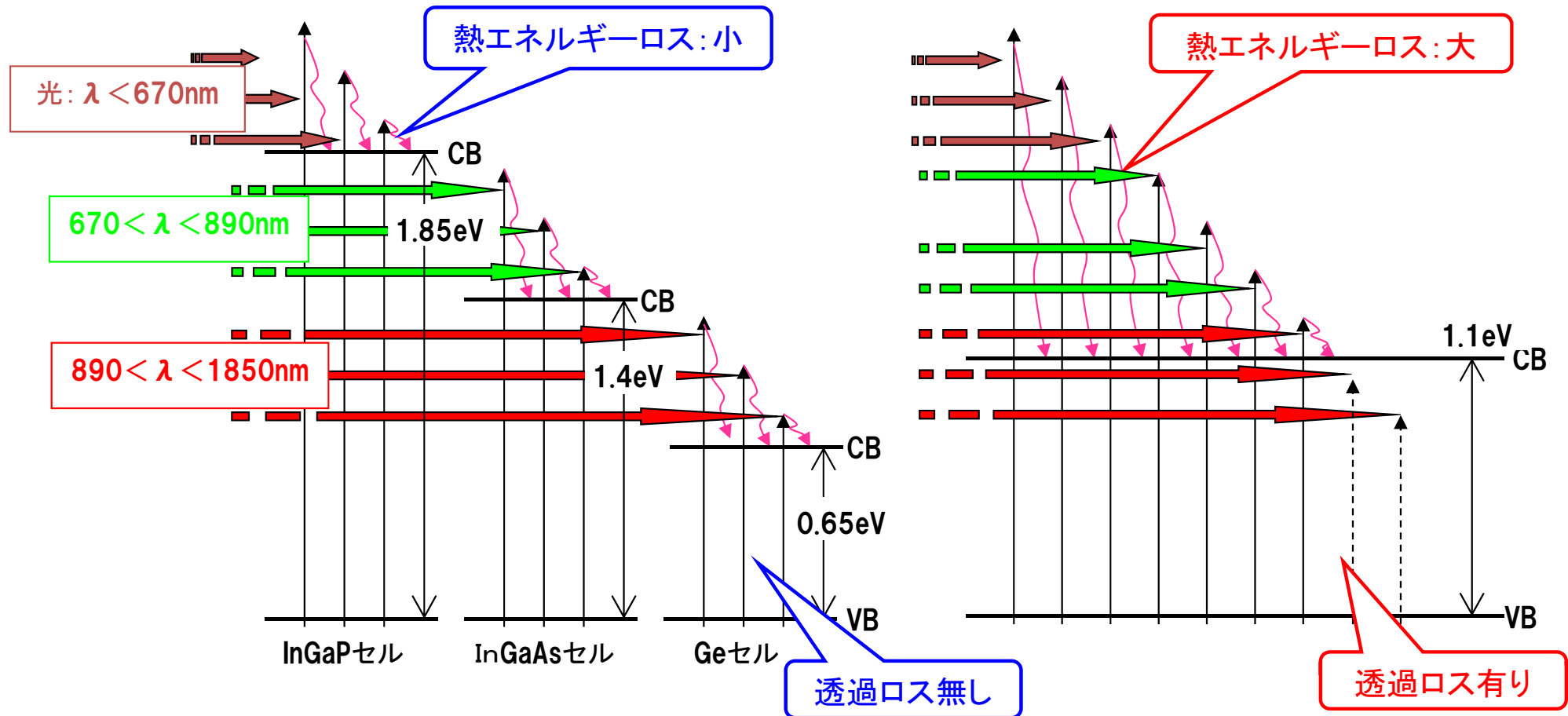
InGaP/InGaAs/Ge 3接合セル

Si 単接合セル

多接合型の導入

多接合型は、高い効率が得られる。

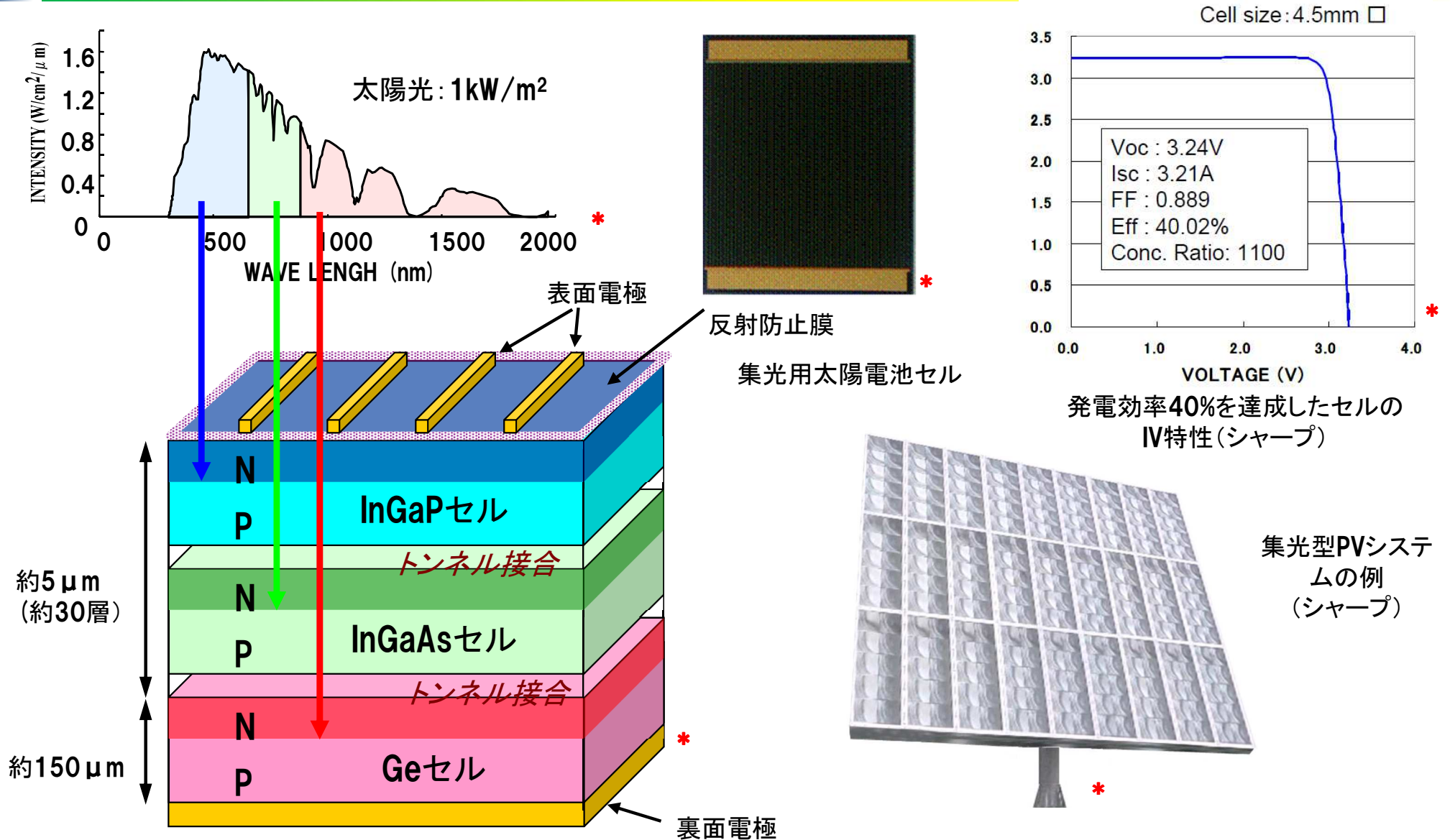
- ① 低エネルギー(長波長)の光子も吸収・利用
- ② 熱(格子振動)へのロスをも最小限に抑制



InGaP/InGaAs/Ge 3接合セル

Si 単接合セル

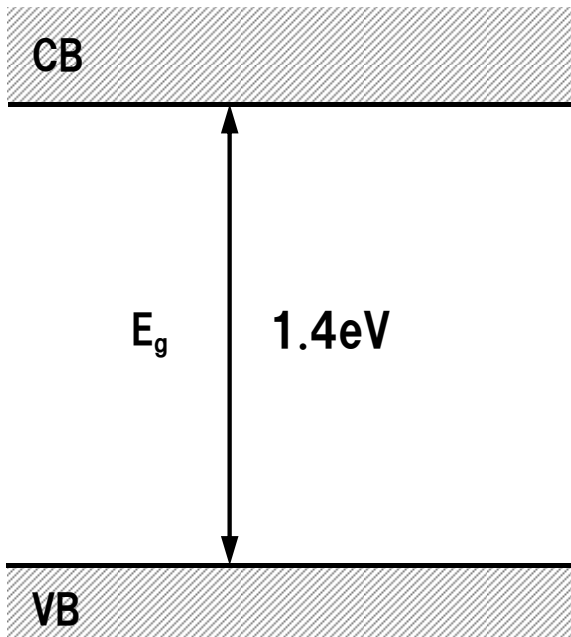
多接合化合物(集光)



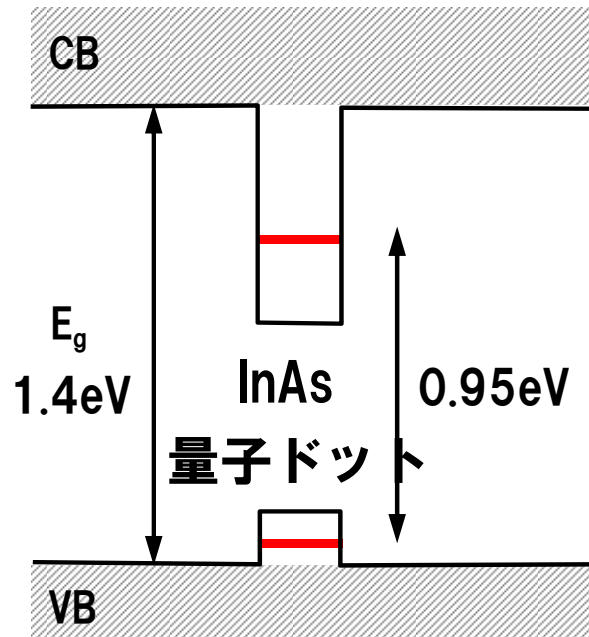
問題点 ①構造が複雑 ②高生産コスト

量子ドット

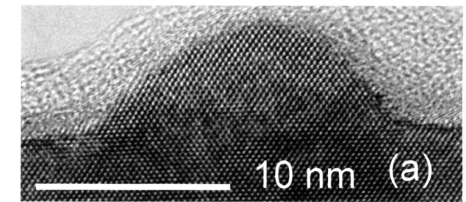
- 1982年に荒川らが提唱した数nm程度の寸法のナノ構造
- 量子ドットに閉じ込められた電子のエネルギー準位は離散化
- 電子のエネルギーは量子ドットのサイズで自由に制御
- 量子ドットレーザーは既に市場化済み



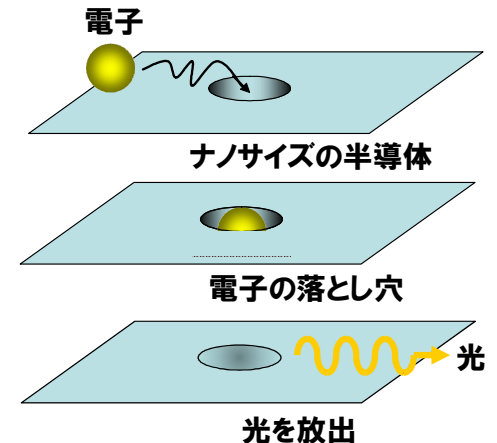
バルクGaAsのバンド構造



InAs量子ドットを埋め込んだ
バルクGaAsのバンド構造

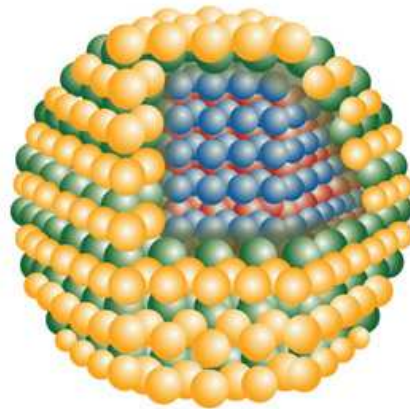


* Reprinted with permission from P.W. Fry et.al. (2000), *Physical Review Letters*, vol.84, pp.733-736. Copyright 2000 by the American Physical Society. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.733>



量子ドットのエネルギー制御

- ・サイズ制御により、自由にバンドギャップを変えられる。
 - ⇒任意の波長の光を吸収・発光できる。
 - ⇒あらゆる波長の光を効率的に利用できる可能性。



* Credit: Evident Technologies Inc.

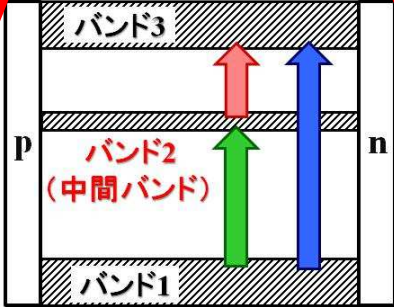
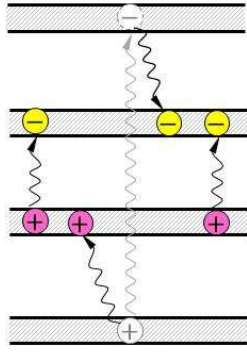
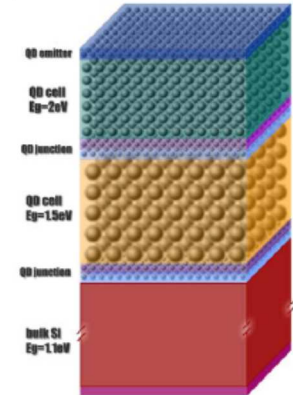
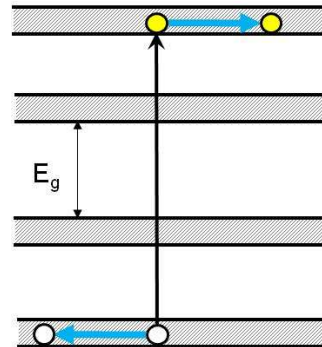
CdSe量子ドット
(ZnSで覆われた構造)



Image by Prof. Michael S. Wong (Rice University)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CdSe_Quantum_Dots.jpg
CC BY-SA 3.0

CdSe量子ドットによる発光
(サイズ変化により吸収・発光波長も変化)

量子ドット太陽電池の諸方式

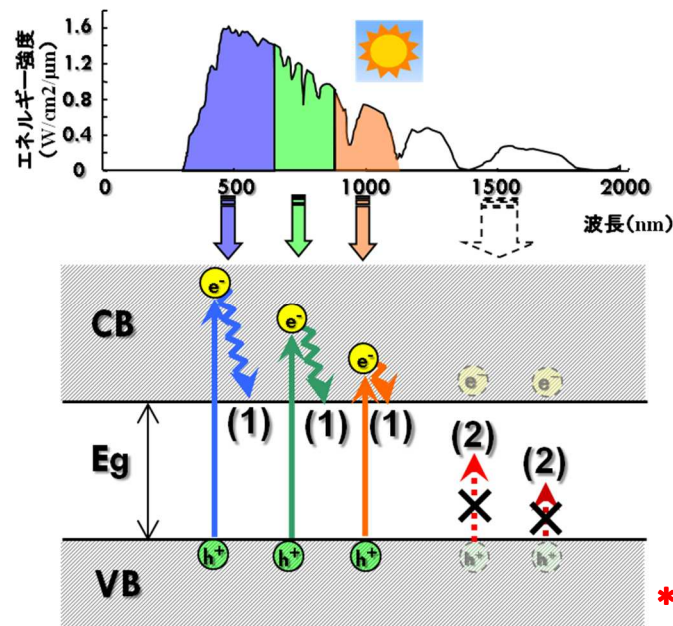
種類	①中間バンド(IB)型 (Intermediate Band)	②多励起子生成(MEG)型 (Multiple-Exciton-Generation)	③量子ドット多接合型 (QD Multi-Junction)	④ホットキャリア型 (Hot Carrier)
コンセプト				
現時点での技術課題	(1)出力電圧の低下 (2)非発光再結合速度との競合 (3)光吸収率向上	(1)マルチエキシトンの生成効率が低い (2)量子ドットから電極へのキャリア注入速度が遅い	(1)子ドット間のキャリア移動が困難 (2)母体が絶縁体のため、電気抵抗が高い	・量子ドットから電極へのキャリア注入速度が遅い
今後の解決策	(1)中間バンドと、母体半導体の伝導帯を電氣的に独立させる手法の探索 (2)歪みが小さく、転位の少ない量子ドット作製手法の探索 (3)最適材料・構造の探索、量子ドット層の厚膜化	(1)マルチエキシトン生成効率の高い材料、構造の探索 (2)キャリアを効率的に取り出せる量子ドット-電極間構造の探索	(1)Si量子ドット間をキャリアが伝導できる構造制御の検討 (2)母体材料の探索	・熱緩和する前にキャリアを効率的に取り出す量子ドット-電極間構造の探索

中間バンド(中間準位)型太陽電池

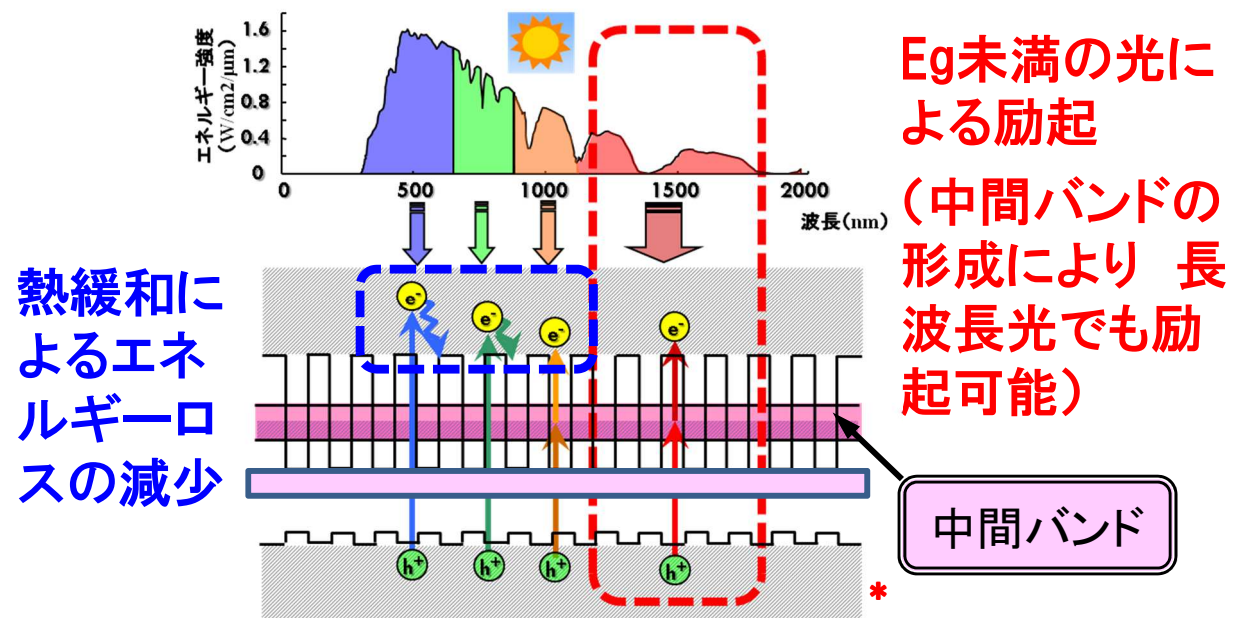
効率向上の原理

- (1) バンドギャップ E_g の母体半導体中に、 E_g 未満のバンドギャップを持つ 量子ドットを導入する事により“中間バンド”を形成し、 E_g 未満の光を利用して光電流を増大させる。
- (2) 太陽光スペクトルを複数のバンドギャップで分割して吸収できるため、熱となって失っていた余剰エネルギーを低減できる。
- (3) 中間バンドにより効率的にキャリア輸送・取り出しを行える

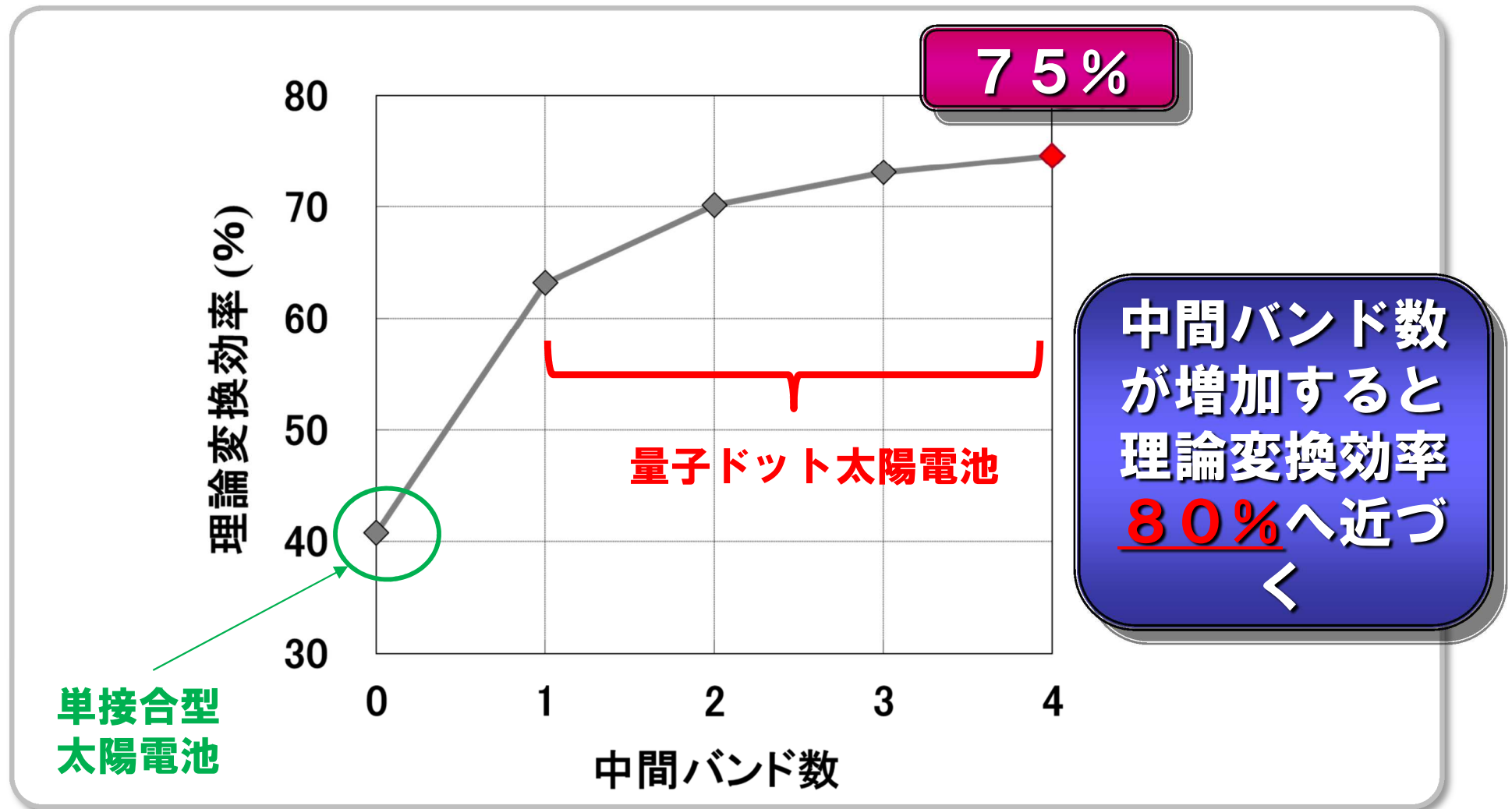
<結晶シリコン単接合太陽電池>



<中間バンド太陽電池>



量子ドット太陽電池の理論変換効率



T. Nozawa, Y. Arakawa, Applied Physics Letters 98 171108 (2011)

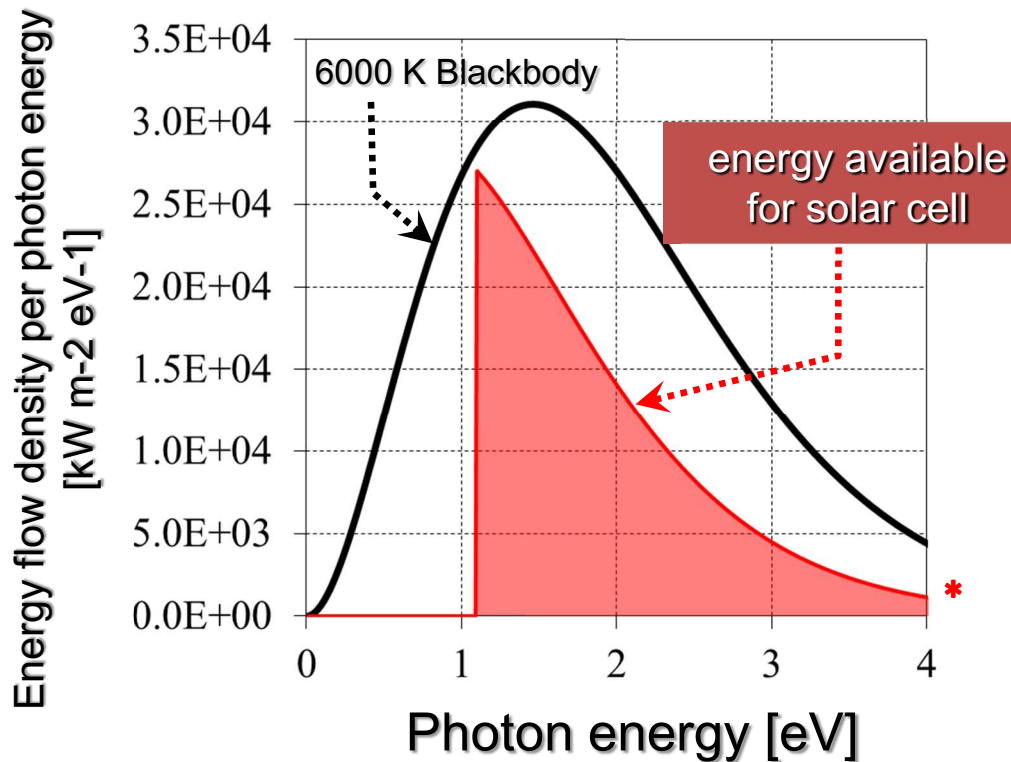
シャープとの共同研究

黒体輻射に整合したエネルギー変換

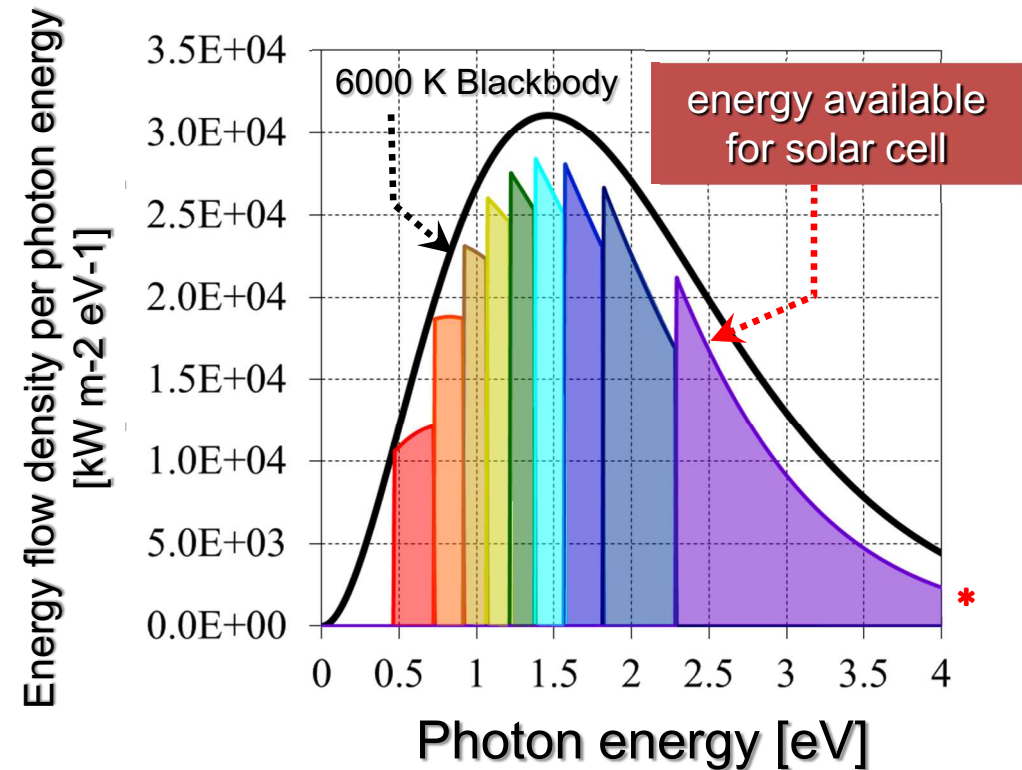
Single junction solar cell $E_g : 1.1\text{eV}$

4 IBSC $E_g : 2.3\text{ eV}$

Efficiency 41% (Full concentration)

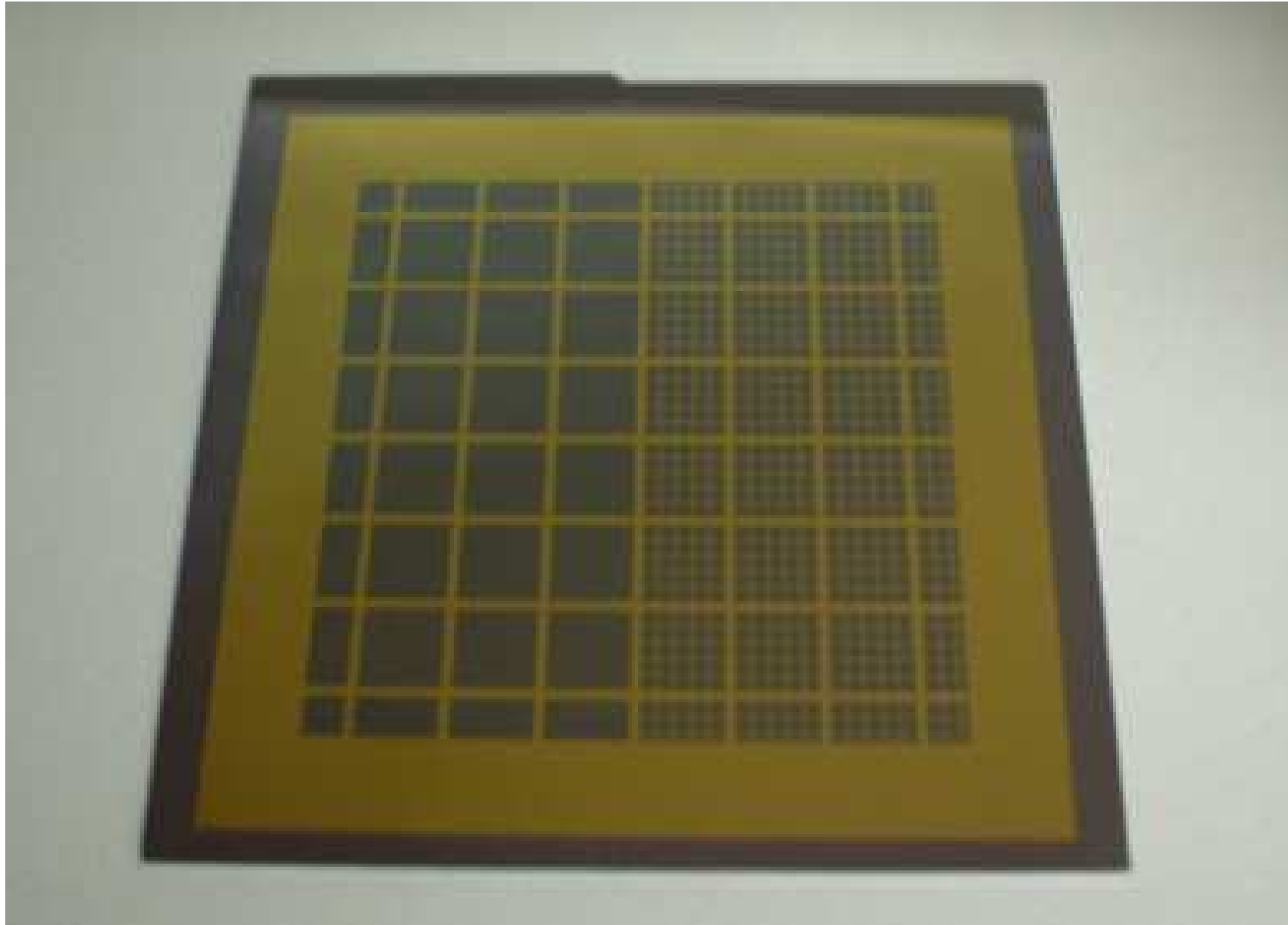


Efficiency 75% (Full concentration)



$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Colored area}}{\text{Black body radiation area}}$$

最高効率量子ドット太陽電池



まとめ

- サイエンスに立脚してテクノロジーが生まれ、エンジニアリングに発展する
- サイエンスの舞台はテクノロジーによって創られる

