

量子ドット研究30年

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
生産技術研究所

研究歴（荒川泰彦）

75 東大工電子卒（宮川・原島研）

80 東大院博士修了（瀧・羽鳥研）

80 東大講師

81 東大助教授

通信からデバイスへ

84 Caltech在外研究（2年, Yariv研）

物理からナノテク研究へ

93 東大教授（生研、先端研等）

本格的な産学連携を開始

07 ナノ量子情報エレクトロニクス研究
機構長

08 日本学会議会員

主要論文発表（10編）

• 光通信拡張デュオバイナリ符号(79)

• 量子ドット&レーザ(82)

• 量子効果レーザダイナミクス(84)

• 量子細線・ドット形成・物理(92)

• 共振器ポラリトン効果発見(92)

• 単一量子ドット連続状態発見(98)

• 温度安定量子ドットレーザ(04)

• 通信波長帯単一光子発生素子(04)

• 高温動作GaN単一光子発生素子(06)

• 単一人工原子レーザ(10)

講演の内容

- × **量子ドットレーザの進展**
 - + レーザ発展史における位置づけ
 - + 提案から市場化まで
- × **極限単一量子ドット発光素子の実現に向けて**
 - + 単一光子発生素子
 - + 単一人工原子レーザ
- × **今後の展望**

レーザの発展

レーザー (LASER)

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

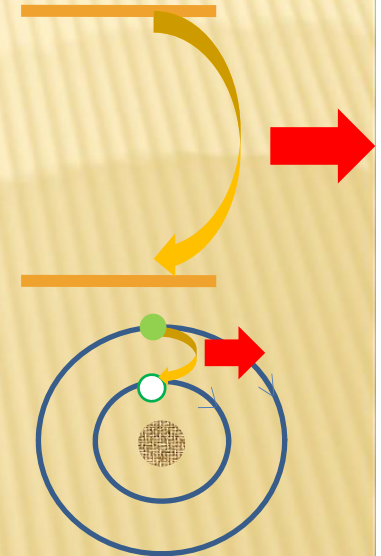
- × 理論 (1958)
- × 固体レーザー ルビーレーザー (1960)
- × 気体分子レーザー He-Neレーザー (1961)
- × 原子・分子系の量子準位間の光学遷移を利用

短所

原子密度が低いために体積が大きい
電流注入不可能



小型化、集積化、低省電力化、
大量生産が困難

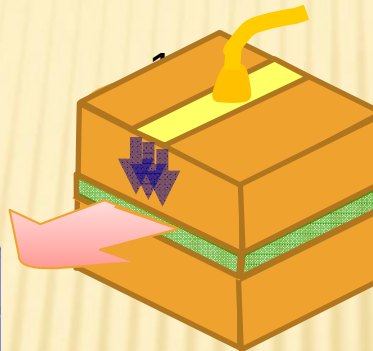
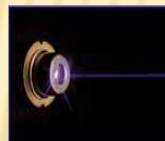


1958 Schawlow and Townes



半導体レーザー

- × ホモ接合レーザー(1962)
- × ダブルヘテロ接合レーザー(1970)
- × InP系通信用レーザー(1976)

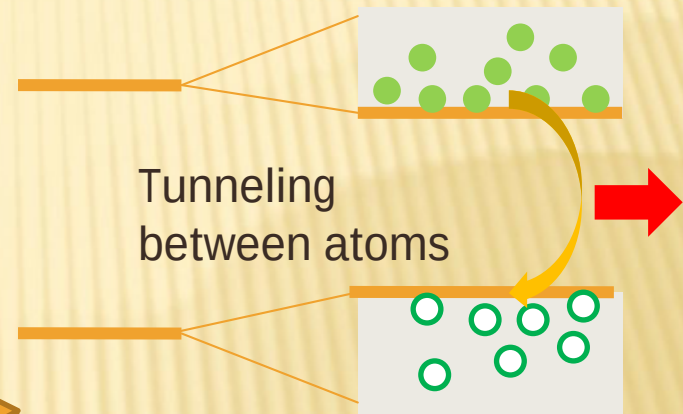


長所

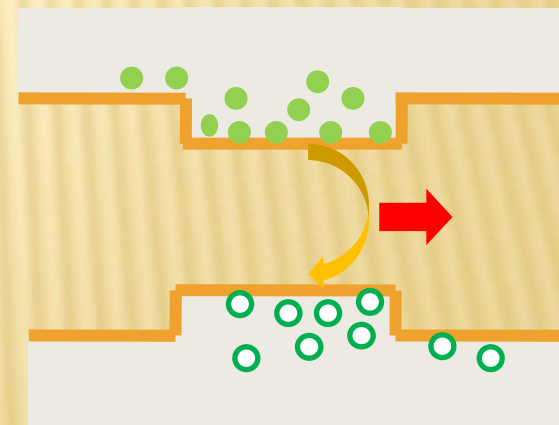
高い電子密度→小さな活性層体積
電流注入可能、大量生産、集積化

短所

自由キャリアによる熱的広がり
→ 閾値電流の温度依存性



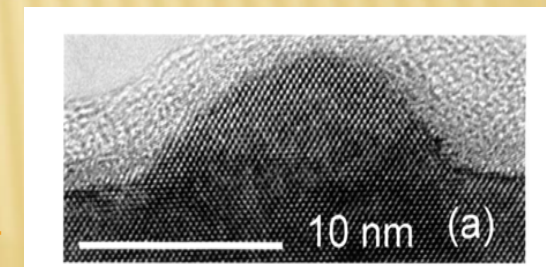
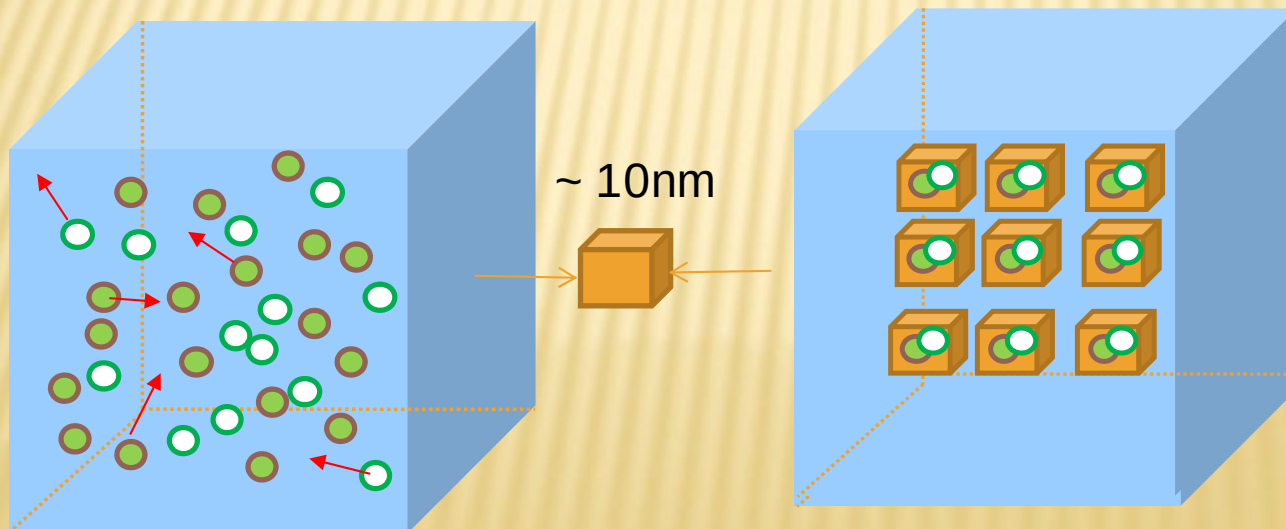
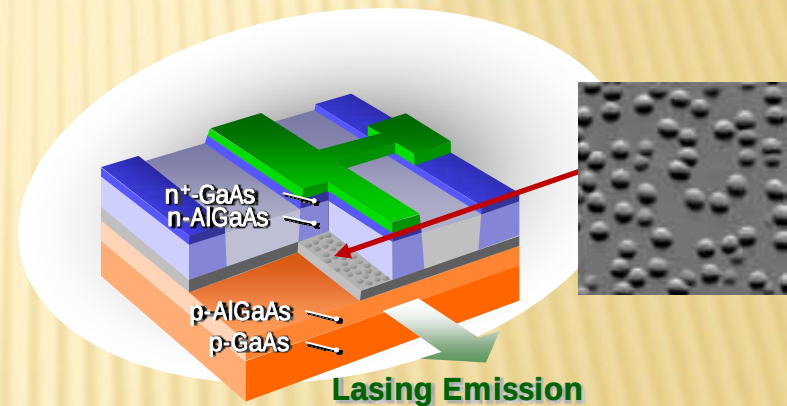
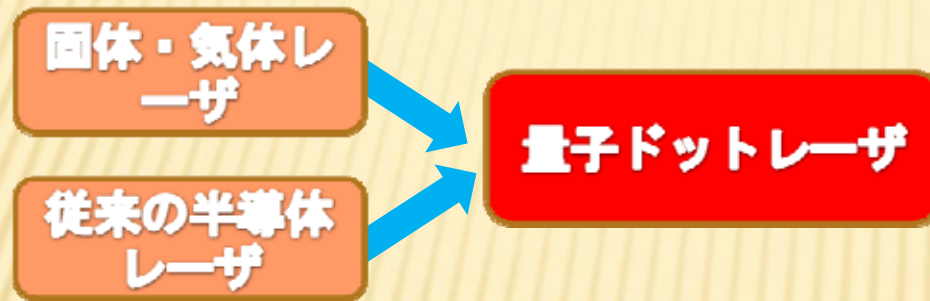
Tunneling
between atoms



Double heterostructure (DH)

量子ドットレーザ

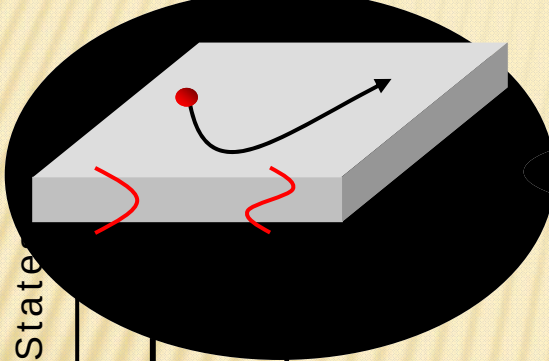
- × **固体レーザと従来の半導体レーザの両方の長所を有するレーザ**
- × **小型、電流注入可能、温度安定、大量生産**



電子の状態密度とレーザ利得

量子井戸

2次元電子



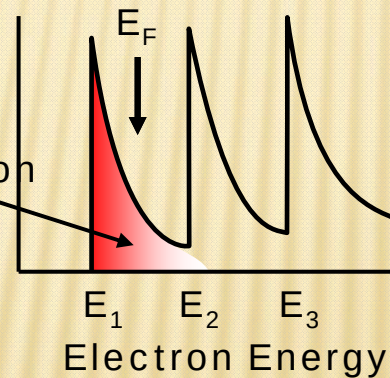
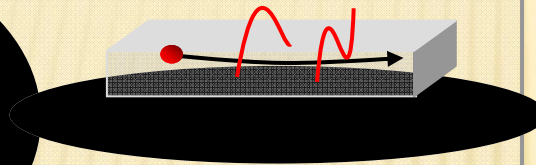
Density of States

Thermal Distribution of Electrons

E_1 E_2 E_3
Electron Energy

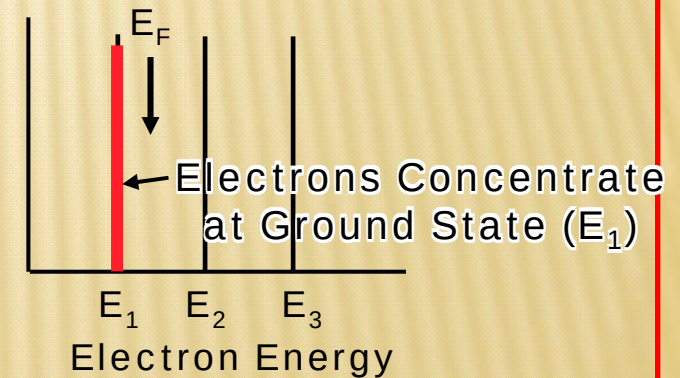
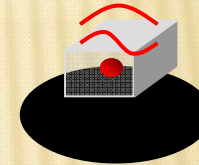
量子細線

1次元電子



量子ドット

0次元電子



量子ドット(量子箱),レーザ応用の提案

939

Appl. Phys. Lett. **40**(11), 1 June 1982

0003-6951/82/110939-03\$01.00

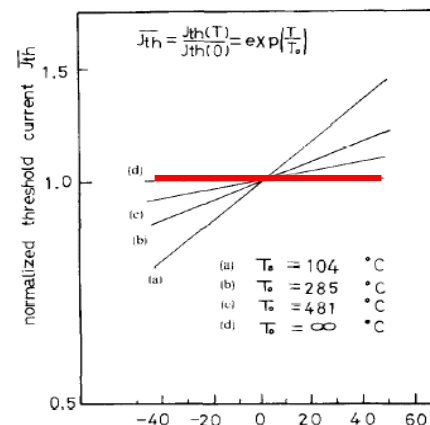
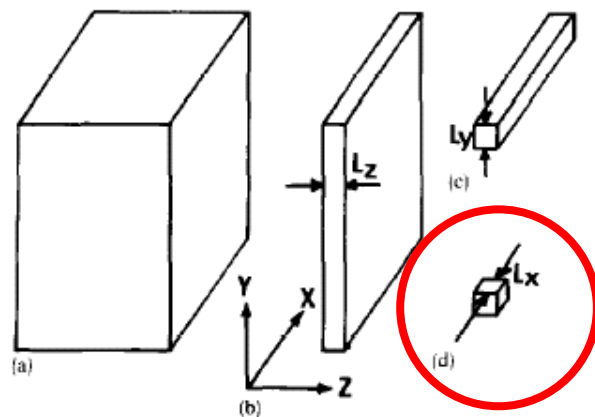
© 1982 American Institute of Physics

Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current

Y. Arakawa and H. Sakaki

Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Minato-ku, Tokyo 106, Japan

(Received 19 January 1982; accepted for publication 23 March 1982)



80年代における理論計算

• 提案

Y. Arakawa, H. Sakaki, APL (82).

• 温度安定性

Y. Arakawa, H. Sakaki, APL (82).

• 高速動作

Y. Arakawa, A. Yariv, IEEE JQE (86).

• 狭スペクトル線幅、低チャージング

Y. Arakawa, A. Yariv, IEEE JQE(86)

• p-ドーピング

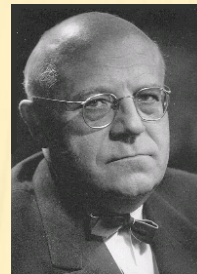
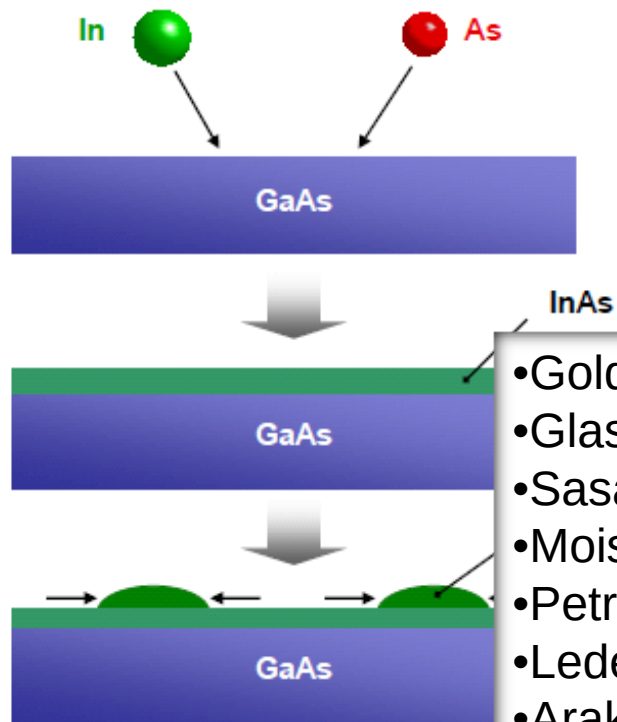
Y. Arakawa, IEEE JQE (91)

• トンネル注入

Y. Arakawa, SSE (1992)

量子ドットの実現

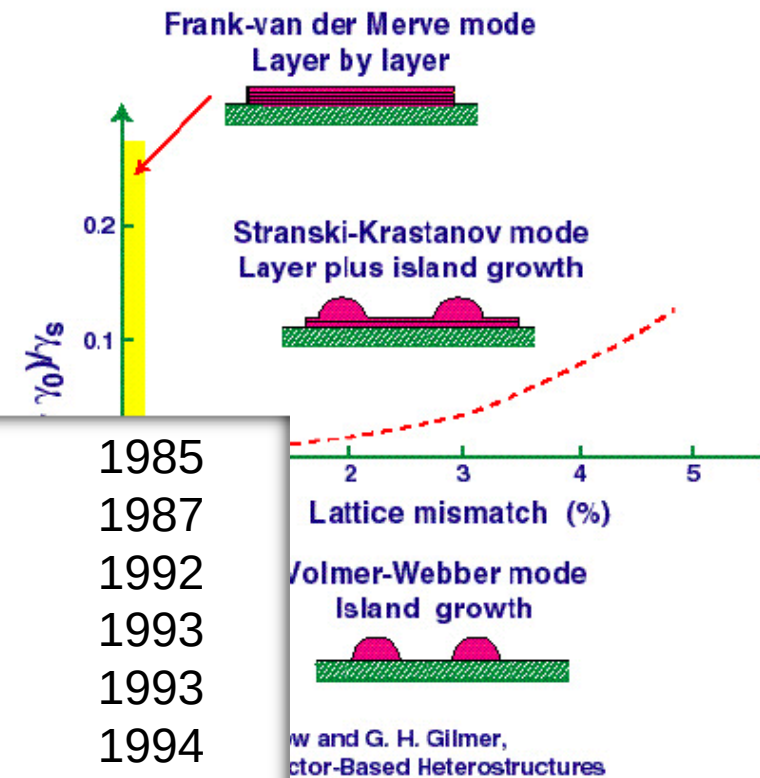
Highly-strained epitaxial growth



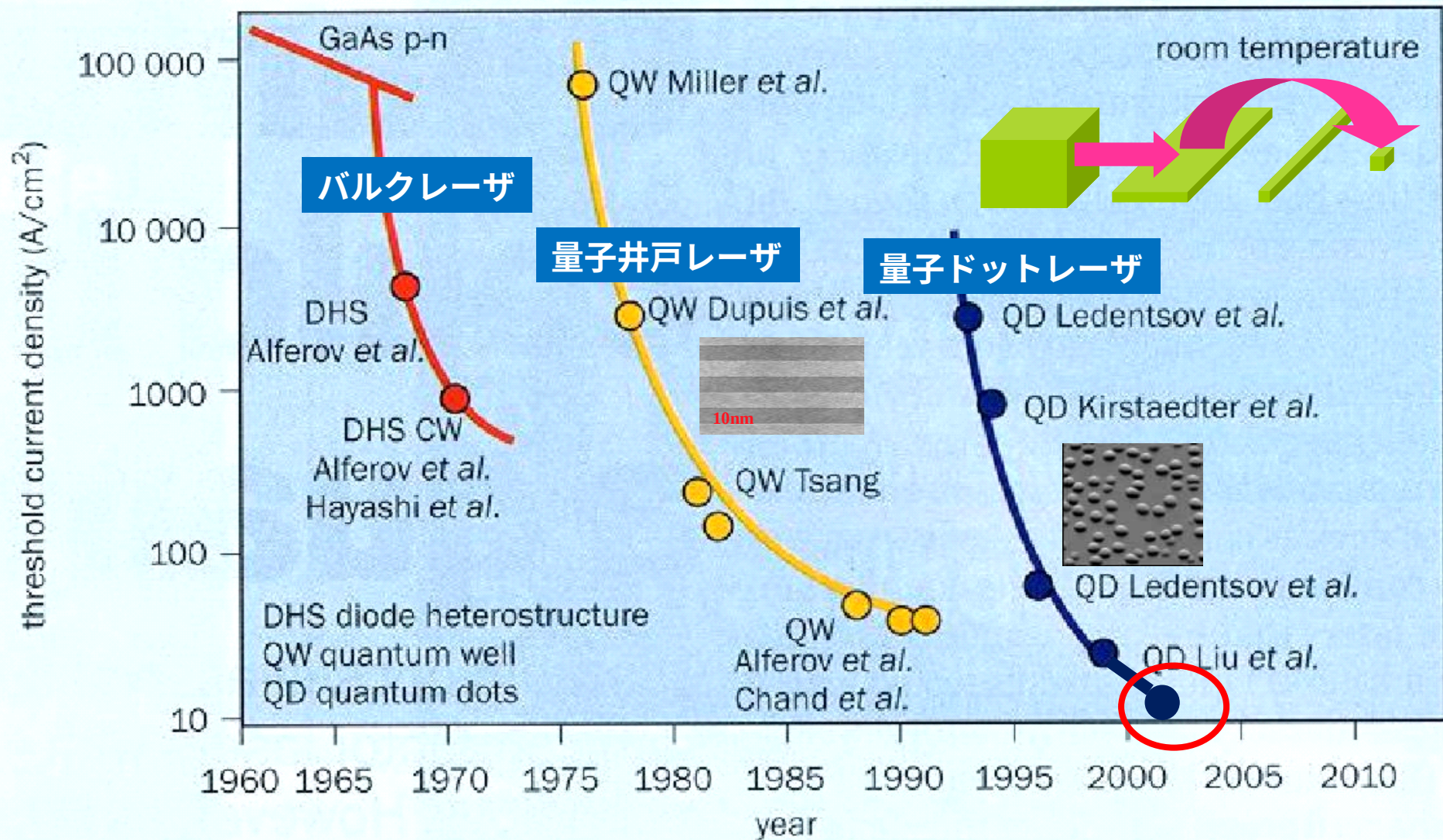
Prof. Stranski

- | | |
|--------------------------|------|
| •Goldstein <i>et al.</i> | 1985 |
| •Glas <i>et al.</i> | 1987 |
| •Sasaki <i>et al.</i> | 1992 |
| •Moison <i>et al.</i> | 1993 |
| •Petroff <i>et al.</i> | 1993 |
| •Ledentsov <i>et al.</i> | 1994 |
| •Arakawa <i>et al.</i> | 1994 |

量子ドットレーザの作製
1994年からスタート

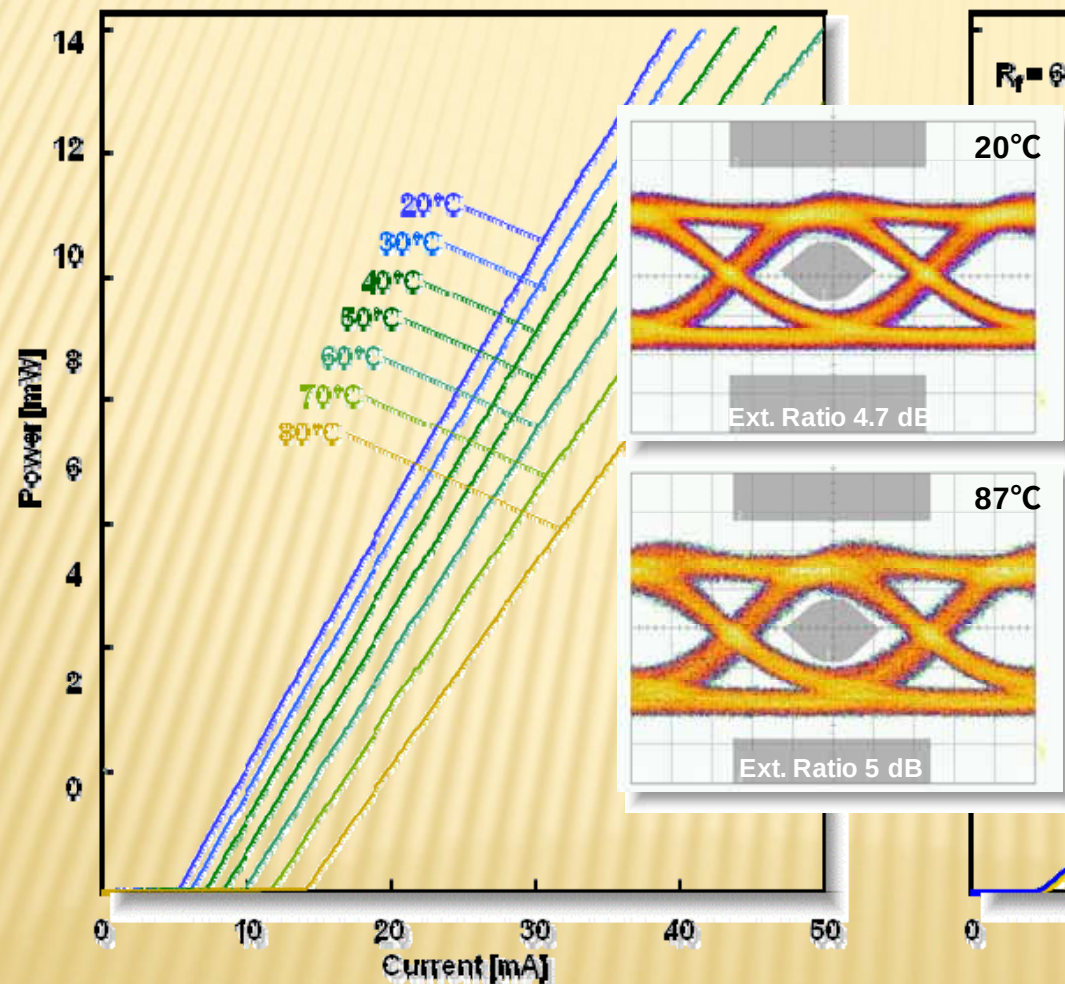


半導体レーザの閾値電流特性

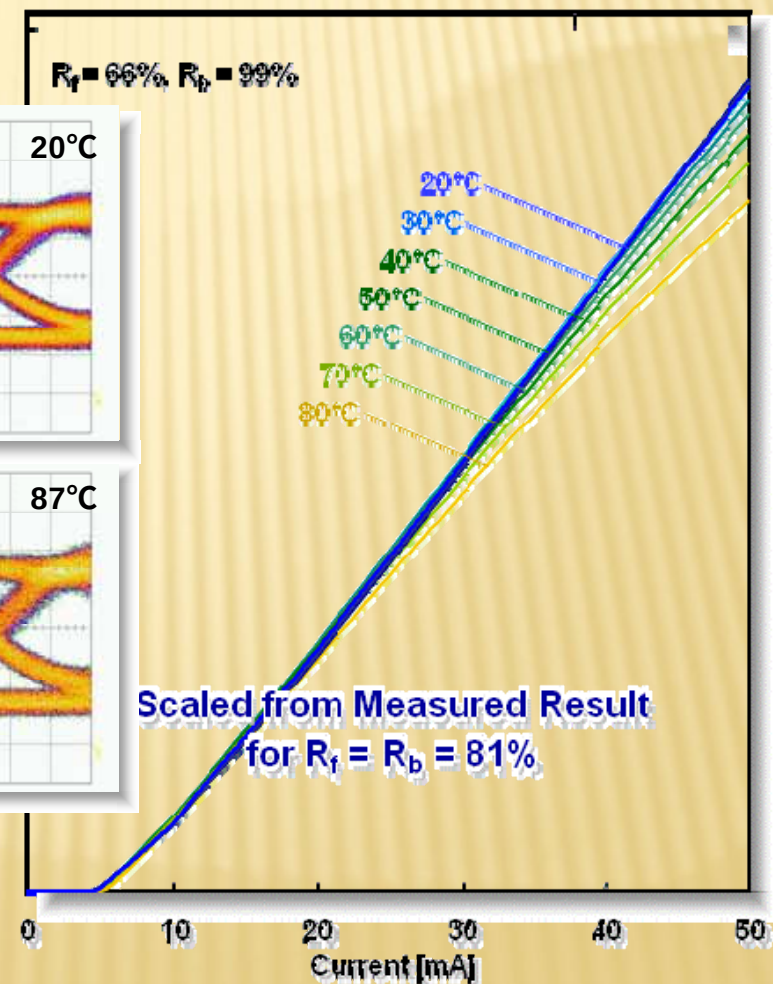


量子ドットレーザの革新（新しい価値）

量子井戸レーザ



量子ドットレーザ (p-ドープ型)



東大、富士通の共同研究成果 (2004)

(株)QDレーザ (2006年発足)

量子ドットレーザの意義

低コスト 可視LDで蓄積された大口径GaAs基板による低コスト生産技術

小型・低消費電力 低消費電力・高温での安定動作により高密度実装

高信頼 20年以上の寿命を検証

高ビットレート・長距離 40 Gb/s以上の高速変調, 1.5 μm 帯LD低チャープ

Telecom



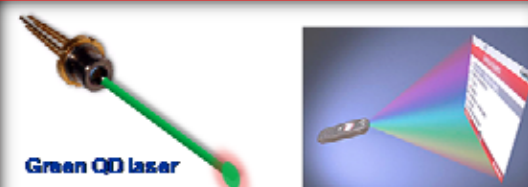
GaAsウェハ

量子ドットウェハ

レーザチップ

光デバイス

Consumer electronics



LSI on photonics



QDレーザ

民生系レーザ
ファンドリ

四半世紀

提案

温度安定レーザ

QDレーザ

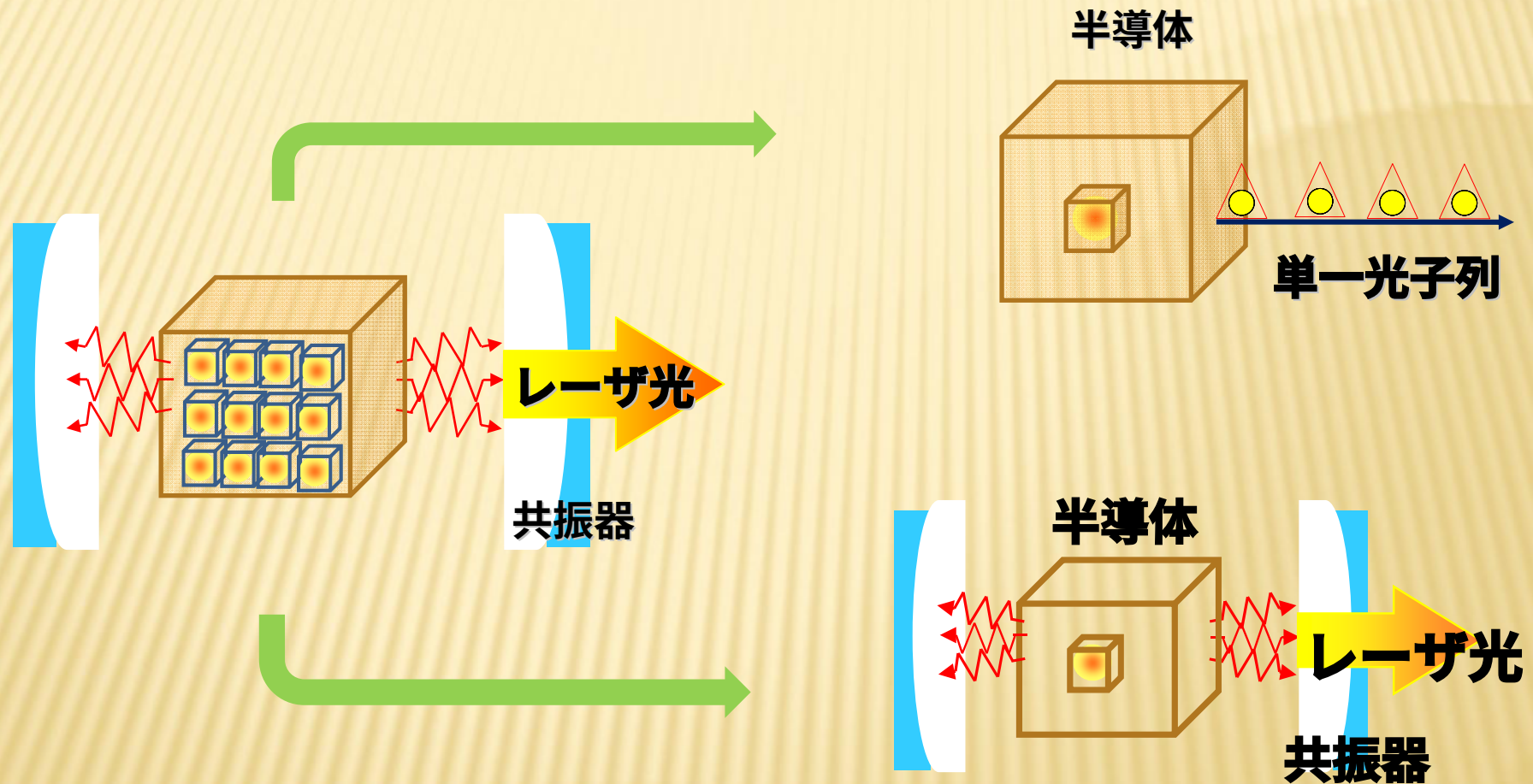
82

04

06

10

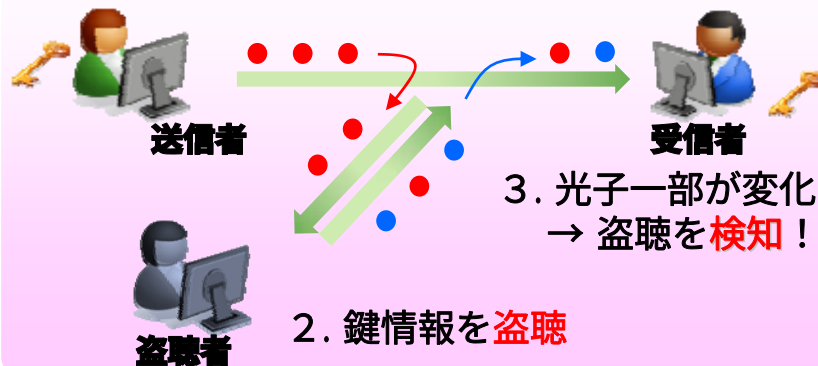
極限単一量子ドット発光素子への展開



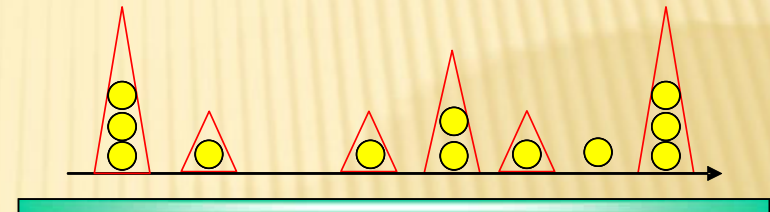
単一光子発生素子と量子暗号通信

量子暗号

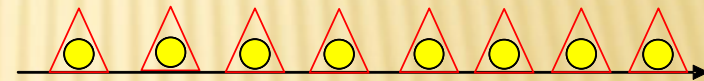
1. 共有鍵を光子1つ1つに載せて送信



微弱レーザ光：ポアソン光子統計



単一光子発生素子：確実な光子数制御



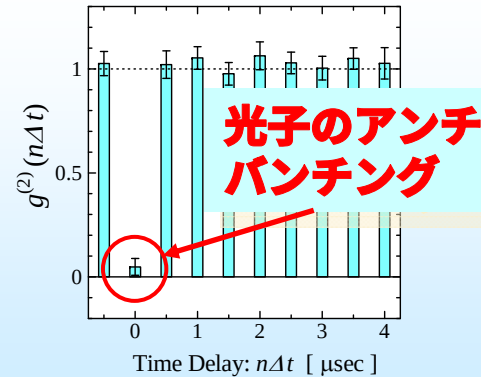
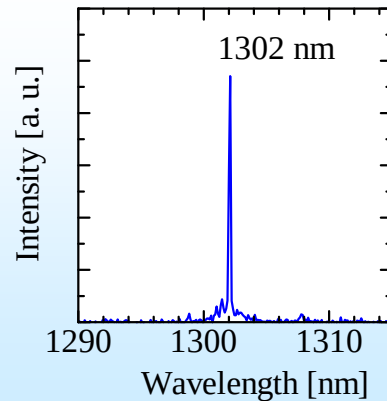
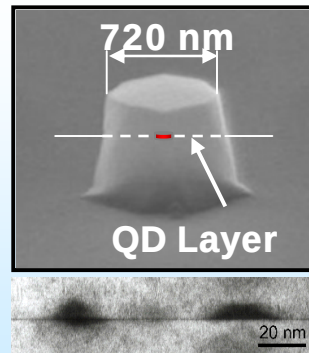
量子ドットを用いた単一光子発生素子

- InAs/GaAs QD wavelength 855 nm [USA (2002)]
- GaAs/AlGaAs QD wavelength 738 nm [France (2003)]
- InP/GaInP QD wavelength 677 nm [Germany (2003)]

.....

しかし、波長 $< 1\mu\text{m}$ 、動作温度は 4.2K

通信波長帯単一光子発生素子の実現



1.3- μm 単一光子発生に成功 (2004)
1.5- μm 単一光子発生に成功 (2005)
東大ー富士通の共同研究の成果



単一光子発生器をシステム実装し、**50 km** の安全鍵伝送を実証
(単一光子方式の量子暗号として**世界最長**)

東大ーNECー富士通の共同研究の成果 (2010)

GaN 単一光子発生素子による最高動作温度 200Kの達成 (2006)

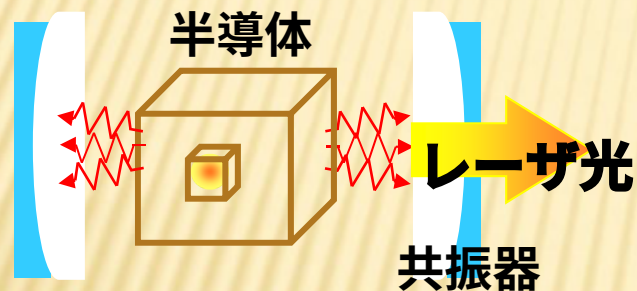
単一人工原子レーザーの実現

1962年 半導体レーザーの実現

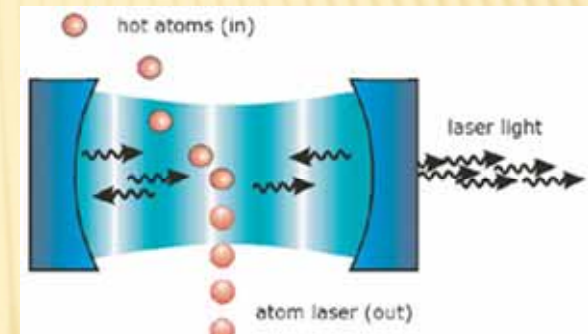
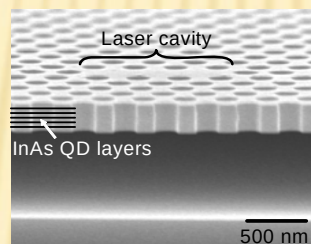
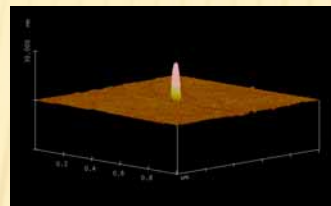
1982年 量子ドットレーザーの提案

量子ドット数万個を活性層に埋め込む構造

2010年 単一人工原子レーザーの実現



共振器電磁力学効果の発現と
極限半導体レーザーの実現



2004 単一原子レーザー



nature
physics

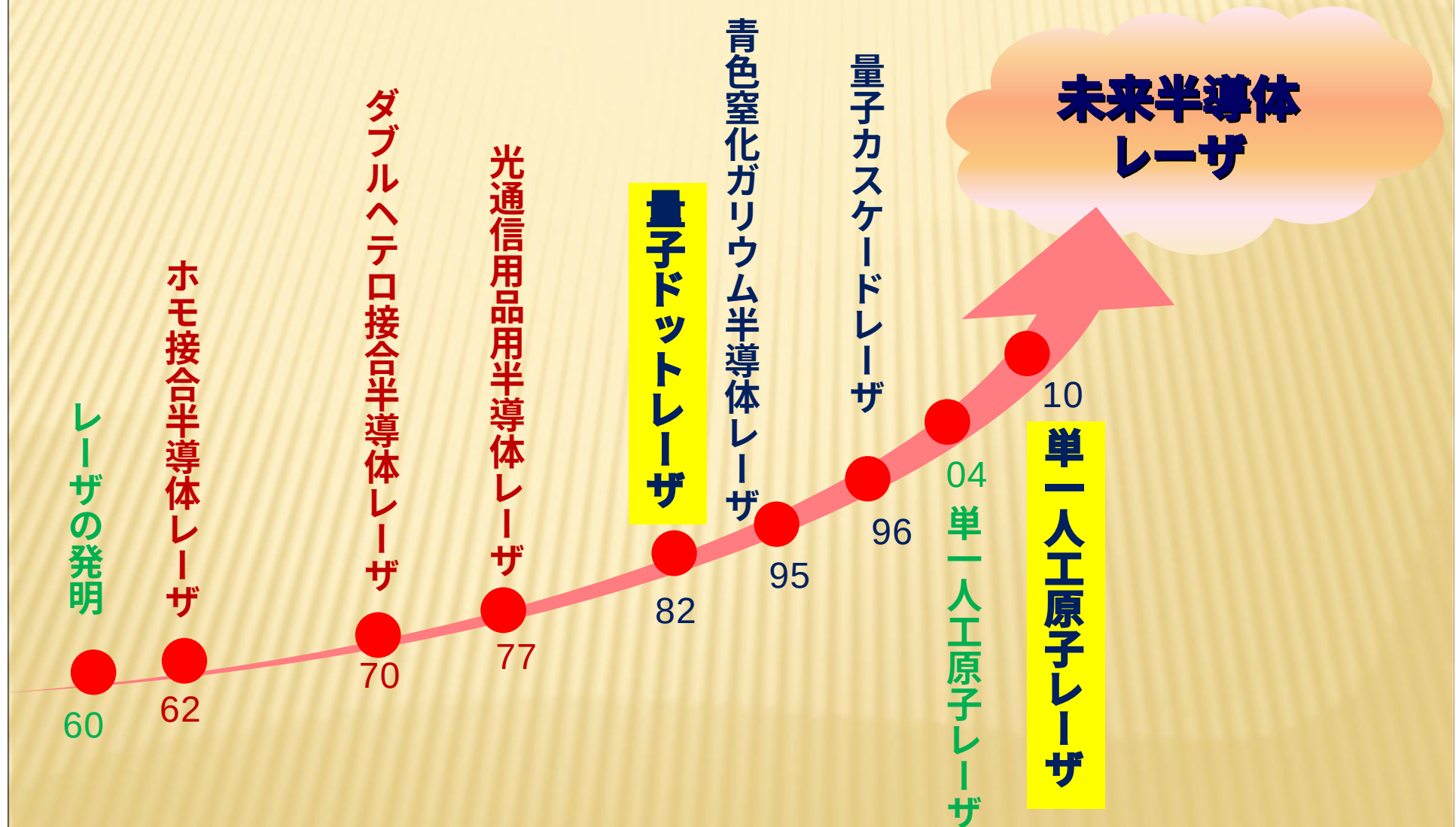
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 7 FEBRUARY 2010 | DOI: 10.1038/NPHYS1518

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

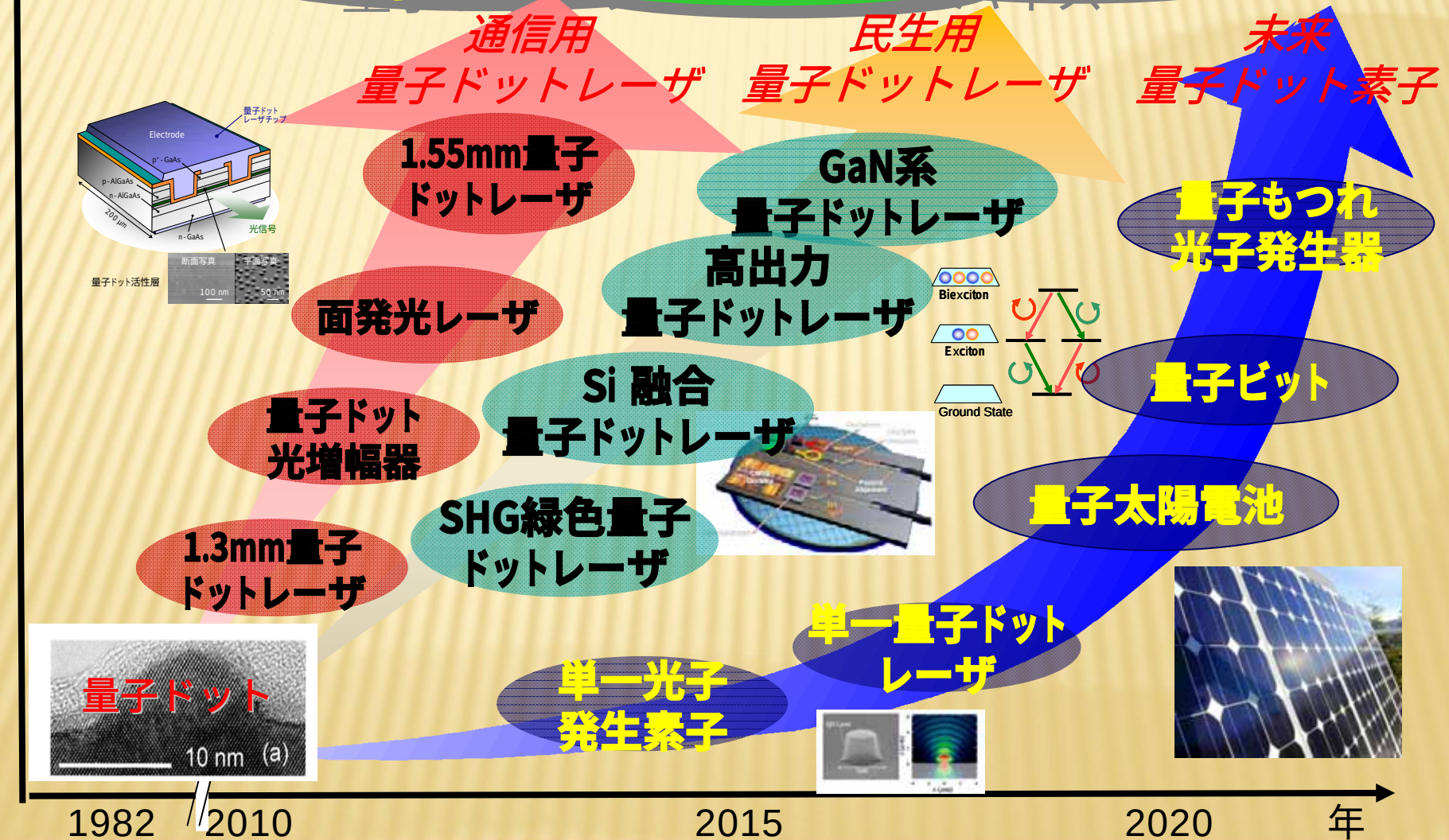
M. Nomura¹*, N. Kumagai¹, S. Iwamoto^{1,2}, Y. Ota^{1,2} and Y. Arakawa^{1,2}*

半導体レーザー発展史における革新



今後の展望：量子ドット素子のロードマップ

グリーンイノベーションを牽引する
量子ドットフォトリックデバイス



展望：産学連携を軸にした研究開発

- × 産学協働によるイノベーション創出と量子フォトニクス科学への貢献
- × 光、ナノ、量子の融合による高効率情報社会、量子計算、エネルギーの諸課題への挑戦
 - + 先端融合領域イノベーション創出プログラム (NanoQuine)
 - + 日立、NEC、富士通、シャープ、QDレーザ、
- × 光とシリコンの融合による未来LSI技術の革新
 - + 最先端研究支援プロジェクト (PECST)
 - + 日立、NEC、富士通、沖、NTT、産総研
 - + インテル（米国）の参画

謝辞

**NEC C&C財団および審査委員会の皆様、
長きにわたり御指導、御鞭撻を賜った諸
先生方、多くの共同研究者の皆様に対し
て、心より御礼申し上げます。**