

I n A s 量子ドット・ナノワイヤ

下村 和彦

1. 研究目的

近年の情報化社会では、生活の隅々までネットワークやコンピュータが存在するようになりつつある。それに伴い、情報通信のネットワークに要求される伝送容量が飛躍的に増大し、さらなる通信用デバイスの高機能化が求められている。近年のこうした急激な情報技術革新の流れの中で、情報伝送・転送機能を光領域で行う光通信は、今後「いつでも、どこでも、だれでもネットワークに接続できる」というユビキタス社会の実現に向け、必要不可欠な技術である。

光通信システムは基本的に、「送信器」、「伝送器」、そして「受信器」の3つの要素で成り立っている。今後、さらなるネットワークの情報容量が増加し、ネットワークの幹線系からエンドユーザまで、至る所において電子処理を用いずに光のままに情報のやり取りを行う「フォトニックネットワーク」の構築が必要とされてくる。この要求に応えるためには、先ほど述べた3つの要素の性能のさらなる高機能化や新規デバイスが求められている。

このようなデバイス性能の向上や新規デバイスの必要性に応える要素として量子ドットやナノワイヤなどの低次元量子構造が挙げられる。低次元量子構造は状態密度関数の尖鋭化により、非常に狭いエネルギーに電子が局在化し、電子注入による利得、電界印加による屈折率・吸収係数の変化が増大し、従来作製されてきたレーザ、光増幅器、光スイッチ、光変調器などの光デバイスが飛躍的に向上することが期待できる究極的な半導体構造である。本研究においては、これら量子ドット構造、ナノワイヤ構造の光デバイス応用を目的として、有機金属気相成長による結晶成長条件の把握、最適化、そしてこれらの構造を用いた光デバイスの作製、特性評価を行った。

2. 研究方法

2.1 量子ドット構造の作製原理

現在、ナノ構造形成技術は、半導体微細加工技術を用いたトップダウン方式と、分子・原子レベルの自己組織化を利用したボトムアップ技術の双方からの急速な進展により、材料・構造ともに守備範囲が急速に広がってきている。現在広く用いられている MBE

(Molecular Beam Epitaxy : 分子線エピタキシー) 、 MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy : 有機金属気相成長法) のような成長技術では、垂直方向の成長に対しては、単原子層レベルの膜厚制御性を備えているため、量子井戸は高精度に作製できる。しかし、量子ドットを形成する場合には、面内の2次元方向のヘテロ構造を実現する必要があり、そのためには、特別な手法が必要となる。我々は自己形成法を用いた量子ドットの作製を行ってきた。自己形成法の原理である Stranski-Krastanov 成長モードは、下地結晶と成長膜の歪みが大きい場合に二次元平面成長が三次元島構造の形成に変わる結晶成長形態である。S-K ドットの形成の原理を InP(001)基板上に InAs を作製した例について、成長モデルと成長に伴う歪エネルギーの時間変化モデルを図1に示す。まず、成長初期段階では InAs 層が2次元的な F-M モード成長を続ける。このとき、InAs 層は基板面内では2軸方向から圧縮歪みを受け、力学的に不安定となり、歪みエネルギーは膜内に徐々に蓄積されていく。しかし、歪エネルギーの影響はまだ小さいため表面エネルギーを最小とするべく平坦表面が形成される。さらに成長膜厚が増加しても、ある程度までは表面平坦性が持続する。この時点では、全歪エネルギーは増大するも、表面エネルギーを含めた系の全エネルギーは平坦表面で最小である。さらに臨界膜厚を超えるまで成長が進むと、島状構造が形成される。この時点では、表面に平坦層(ぬれ層:wetting layer)を残し、部分的に3次元的構造が形成され歪緩和する。このとき3次元構造では、成長方向への格子の歪みが小さくなるというひずみ緩和効果が期待できる。しかし、島状形状の形成による表面積の増加によってダングリングボンド(未結合手)数が増加するため、表面エネルギーは増加する。しかし、歪エネルギーは減少するために全エネルギーは低下し2次元構造を取るよりは安定となる。

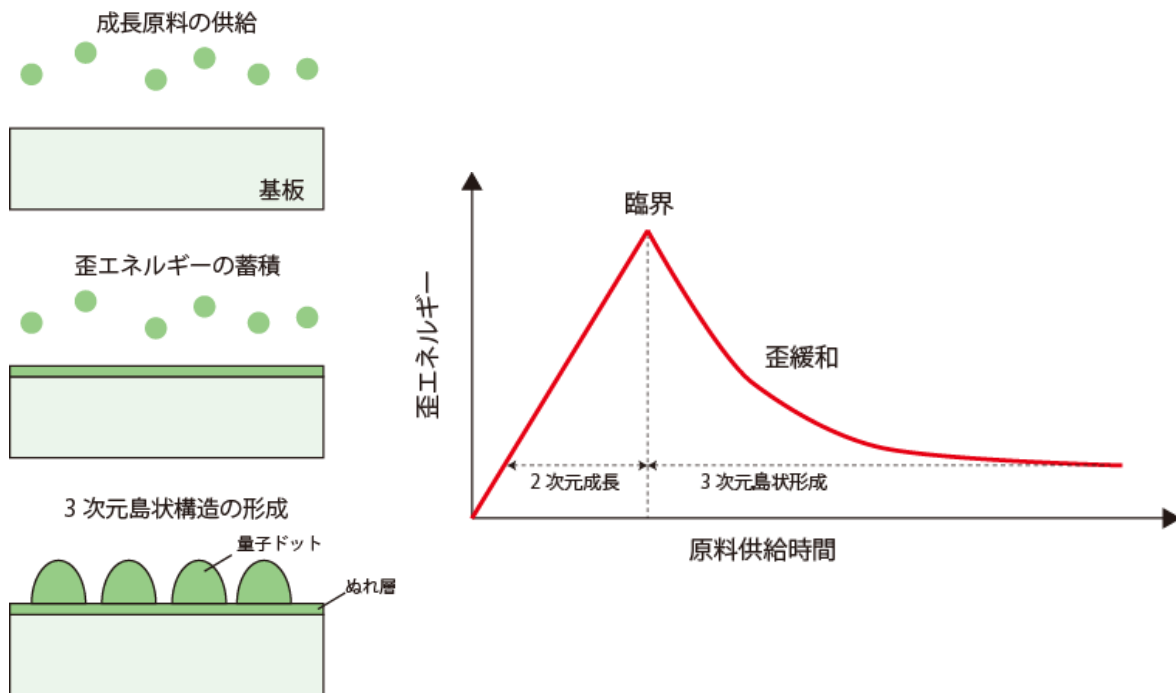


図1： 成長モデルと歪エネルギーの時間変化

2.2 ナノワイヤ構造の作製原理

半導体ナノワイヤの研究報告が増加した背景には、VLS成長法を利用した作製方法の普及がある。これは量子細線や量子ドットの基本的な作製方法が結晶成長から結晶加工、さらに結晶成長を繰り返す複雑なものであったのに対し、Au粒子を触媒にして自発的に結晶成長させる非常に簡易的な方法であったからである。VLSとは結晶が成長する過程を表したもので、気相(Vapor)状態にある原子が一度液相(Liquid)状態となり、次に固相(Solid)を形成する成長法のことである。このVLS成長法を利用して、金属を触媒にする代わりに自身のIII族元素を触媒としてIII-V族化合物半導体ナノワイヤを成長させたのが自己触媒VLS成長法である。この成長法は2005年にC. J. Novotny、P. K. Yuによって報告され、Au微粒子の代わりにIn微粒子を用いてInP(111)B基板上にInPナノワイヤが成長されることが明らかになった。

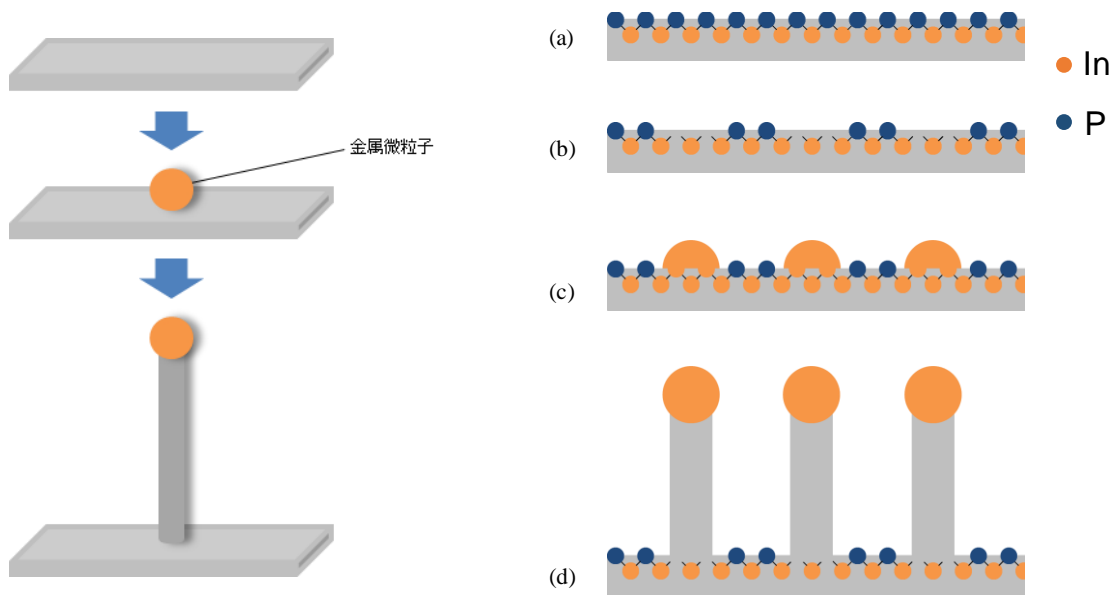


図 2： 金属触媒 VLS 成長法と自己触媒 VLS 成長法

自己触媒 VLS 成長法の成長原理は、図 2 に示すように(a) 表面が P で覆われている InP(111)B 基板を成長基板として用い、(b) 基板を加熱することにより、基板表面上の P が抜け、In が多く存在する In-rich 面となる。そして(c) P のダングリングボンドが欠如したことで In が結合しやすい状態となり、ナノワイヤの原料となる TMI を供給することで In 同士が結合し、In ドロップレットが発生し、(d) In ドロップレットが金属微粒子と同じ作用を引き起こし、成長中に液相状態となり、III 族と V 族の原料を供給することにより InP ナノワイヤが成長する、と考えられる。

自己触媒 VLS 成長法の成長原理は VLS 成長法に対し金属触媒の物性が異なる。VLS 成長法では触媒として金属と半導体の共晶合金が用いられていたが、自己触媒 VLS 法では In を触媒とする。共晶合金の融点は 400°C 付近であるのに対し、In の融点は 157°C であるため、400°C 以下の成長条件であっても触媒の機能を持ちナノワイヤを形成することが可能となる。また、装置内での基板加熱により P を除去した後、TMI 供給により In 微粒子を形成するという MOVPE 成長過程で触媒を形成することから、金属微粒子を塗布するプロセスが不要となることや、加熱温度の変化による触媒の数の制御が可能となる等の利点がある。以上の点から、低コストで高品質なナノワイヤが成長出来る新たな作製技術として注目され、様々な研究がされている。

3. 研究成果

3.1 アレイ導波路型広帯域量子ドット LED

アレイ導波路型広帯域量子ドット LED は、S-K 成長モードによる自己形成量子ドットと MOVPE 選択成長法により作製している。選択成長は、厚さ 300nm の SiO_2 薄膜をプラズマ CVD によって(100)InP 基板に堆積させ、非対称アレイ導波路マスクを用いて成長温度 640°C 、成長圧力 100Torr、ドット部については成長温度 540°C 、成長圧力 15Torr で行っている。このマスクは片側に幅の広いマスク（以下ワイドマスク）を配置した非対称構造であり、ワイドマスク幅は $W_w = 200 \mu\text{m}$ である。非対称なマスクを用いて MOVPE 選択成長を行うことで横方向気相拡散、表面マイグレーションという二つの現象が起こり、それぞれのアレイにおいては量子ドットのサイズが異なり、結果的にバンドキャップの制御を可能にしている。さらに各アレイにおいて量子ドット高さを制御し波長差をつける方法として量子ドット成長後に 2 段階に分けてキャップ層を設けるダブルキャップ法を利用している。これにより基板に対し水平方向における波長制御を実現している。また量子ドットを多層化する上で FCL 層厚を変化させる手法で基板に対して垂直方向の波長制御も実現している。このダブルキャップ法（図 3）では、まず(1)InAs 量子ドットを成長し、そして(2)InP キャップ層（First Cap Layer : FCL）を数 nm 程度成長する。次に、(3)tBP 供給下で成長中断を 2min 程度（1min 以上）導入すると、As/P 交換によりキャップからはみ出たドットが平らにならされる。そして最後に(4)InP キャップ層（Second Cap Layer : SCL）を成長する。

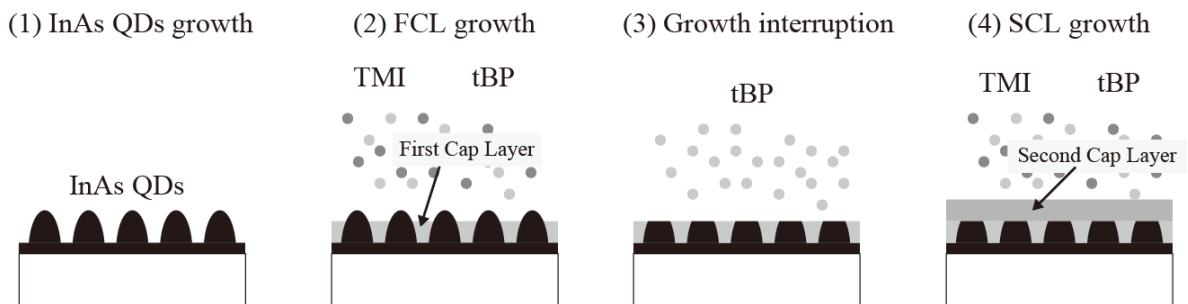


図 3：ダブルキャップ法原理図

このアレイ導波路選択成長とダブルキャップ法を用いた量子ドット構造を用いることによって量子ドットの発光波長を導波路ごとに変えて、広帯域な LED を実現した [d12,d13]。実際に試作した量子ドット LED は、ワイドマスク幅 $200\mu\text{m}$ 、アレイ導波路数 16 本である。図 4 に平坦領域における LED の層構造を示す。コアは 3 層構造になってお

り、FCL層厚、GaInAsバッファ層の組成をそれぞれ変化させた構造となっている。図5はLEDの全体と導波路断面のSEM写真である。

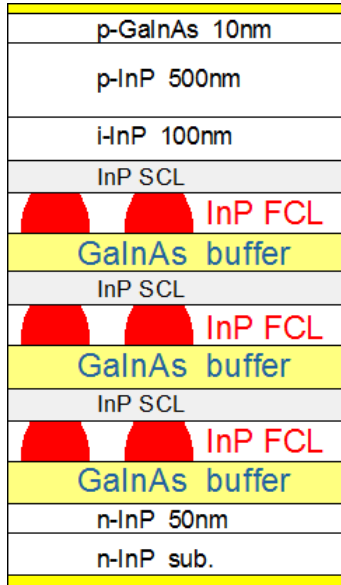


図4：
3層構造L
E D

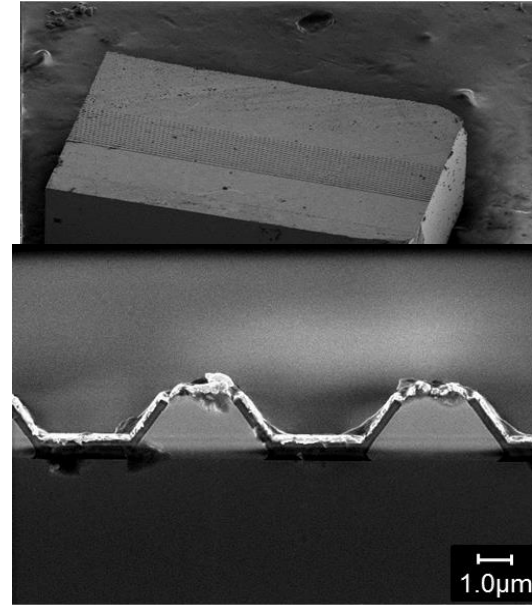


図5： 試作した量子ドットLEDのSEM写真

コア層構造の異なる4種類のLEDをそれぞれサンプル1,2,3,4とし、そのELスペクトルと半値幅、各層の発光強度解析について比較する。各サンプルのFCL層厚とバッファ層Ga組成を表1に、得られたEL発光スペクトルを図6に示す。

表1： 層構造と半値幅まとめ

	Sample1		Sample2		Sample3		Sample4	
	FCL(nm)	Ga 組成	FCL(nm)	Ga 組成	FCL(nm)	Ga 組成	FCL(nm)	Ga 組成
3rd layer	4.5	0.38	4.5	0.38	5.5	0.38	8	0.47
2nd layer	2.5	0.47	0.5	0.47	4.5	0.38	5.5	0.47
1st layer	1	0.55	2.5	0.47	2.5	0.47	3	0.47

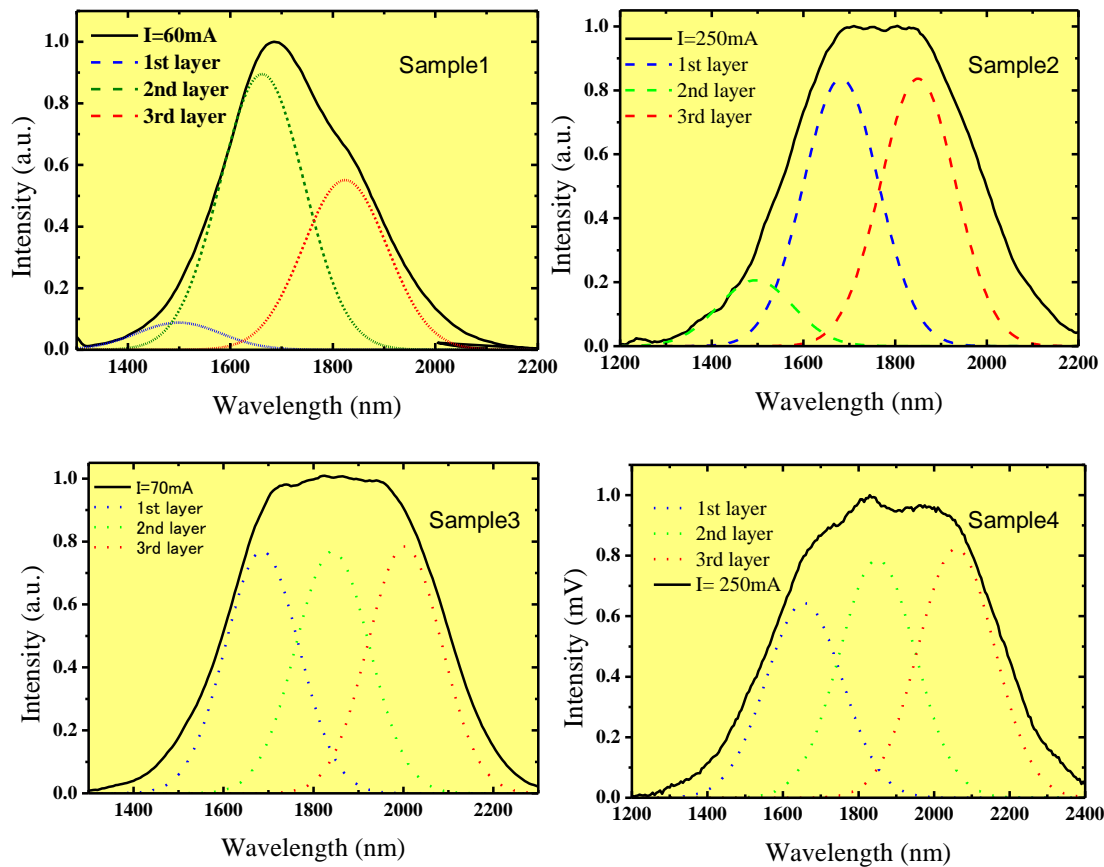


図6：サンプル1~4のEL発光スペクトル

サンプル1の単層でのEL発光結果とFCL層厚依存性から算出した各層のピーク波長はそれぞれ1500nm,1650nm,1800nmとなっている。EL測定の結果として注入電流がI=60mAのとき、半値幅306nmというデータを得たものの、ガウシアンフィッティングによる解析から一層目の発光が微弱であることが分かった。そこで我々はこの原因を、1500nm付近で発光する1層目への電流注入効率が悪いと考え、サンプル2として層構造の改善を行った。サンプル2のコア層構造およびEL発光スペクトルを図?に示す。コア層以外の成長条件は変えていない。発光が微弱であった層を2層目に変え、2層目と3層目の歪の影響が大きくなるようにFCL層厚を0.5nmにし、Ga組成比を0.47としている。各層の予想発光波長は1層目から1650nm,1500nm,1800nmとなっている。

サンプル2において、 $I=250\text{mA}$ のときに半値幅 440nm を得ることが出来た。サンプル1から 130nm 以上の広帯域化に成功した要因は、1層目と3層目の発光強度が同程度になったことが挙げられる。しかし FCL が薄い層からの発光は弱いままであり、発光強度の低下は層の順番によるものではないという事がわかった。この原因としては FCL を 1nm 以下にすることで、ダブルキャップ法の As/P 交換の際にドットが削られすぎてしまったことなどが考えられる。

そこで我々は FCL 層厚を 2.5nm 以上に制限し、 1500nm 付近で発光する層の代わりに 1950nm 付近で発光する層を導入し、デバイスを作製した。各層の発光波長は下から $1650\text{nm}, 1800\text{nm}, 1950\text{nm}$ となっている。サンプル2から比べて、長波化させることで更なる広帯域化を図った。このサンプル3において $I=70\text{mA}$ のときに半値幅 506nm を得た。サンプル2と比較すると 66nm の広帯域化に成功しており、これは1層目から3層目まで各層の発光強度が同程度になったためだと考えられる。さらにサンプル3の EL スペクトルはフラットトップな形を得ており、フラットトップ幅: $\Delta\lambda$ をピーク強度から95%のスペクトル幅、フラットトップ率を $\Delta\lambda/\text{半値幅}$ と定義することで、サンプル2と3の EL 特性を比較した。図7にそれぞれのサンプルにおける各層の発光強度とフラットトップ率の注入電流依存性を示す。

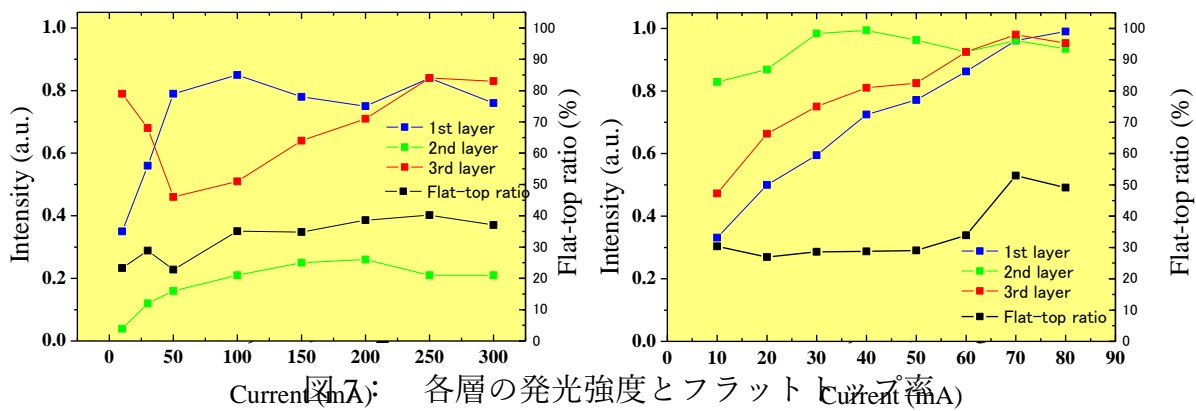


図7: 各層の発光強度とフラットトップ率の注入電流依存性

サンプル2では FCL 層厚の薄い2層目からの発光強度が、注入電流を大きくしても変わらず低いままとなっている。そのためフラットトップ率は上がらず、最大で $I=250\text{mA}$

のときに 40%となっている。サンプル 3 においては注入電流値を大きくしていくと、1 層目からの発光強度も次第に大きくなっていくことで、 $I=70\text{mA}$ で 3 層の発光強度がほとんど同じくらいになり、最大フラットトップ率 53%を得ることが出来た[d8,d9]。

次に我々は更なる広帯域化のために各層のピーク波長間隔を大きくすることを考えた。サンプル 3 において各層の予想発光波長は 1 層目から 1650nm,1800nm,1950nm であったがサンプル 4 では 1650nm,1850nm,2050nm とし、ピーク波長間隔を広げることで広帯域なスペクトルを得られるような構造とした。実際に設計した層構造に比べて、単層の LED と FCL 層厚依存性から算出される予想発光波長が 50nm 程ブルーシフトしているが、これは量子ドットの成長圧力が変わったことが影響している。上記の EL スペクトルにおいて、 $I=250\text{mA}$ において半値幅 629nm を得ることに成功した。これはサンプル 3 において 1 層目から 3 層目までのピーク波長間隔が 300nm 程度であったのに対して、サンプル 4 では 400nm まで広げることでより広帯域なスペクトルを得ることが出来たと考えられる。

3.2 VLS 法を用いたナノワイヤの結晶成長条件の把握

3.2.1 Au 微粒子を用いた InAs ナノワイヤ

Au 微粒子を触媒に用いた VLS 法の InAs ナノワイヤの成長条件に付いて説明する。図 8 はそれぞれナノワイヤが高密度に成長した箇所と、低密度に成長した箇所の SEM 画像である。高密度部の密度は $1.2\times 10^8\text{cm}^{-2}$ で低密度部の密度は $2.71\times 10^7\text{cm}^{-2}$ であった。

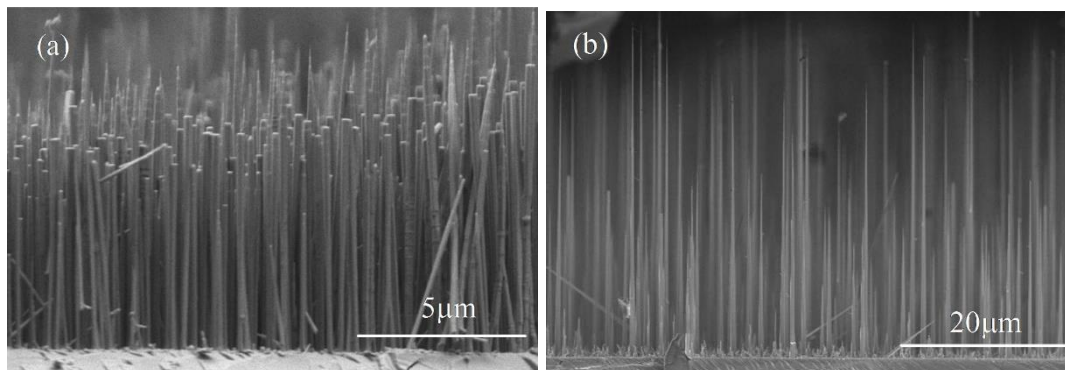


図 8：高密度部(a)と低密度部(b)の断面 SEM 画像

高密度部では全長の短いナノワイヤが多く存在し、反対に低密度部では全長の長いナノワイヤが多く存在していた。それぞれ全長の平均は高密度部が $6.2\mu\text{m}$ 、低密度部が

36.9 μm であった。この結果からナノワイヤの成長速度はその密度に依存していることを確認した。ナノワイヤの成長速度は Au 微粒子に供給される原料の量、すなわち拡散量に比例すると考えられる。高密度領域では Au 微粒子に供給される量が少なく、低密度領域では多くなり、結果的にナノワイヤの長さに差が出たと考えられる。次にそれぞれの密度におけるナノワイヤのテーパの差を比較する。それぞれ図 9 は高密度部と低密度部のナノワイヤの基板からナノワイヤの先端にかけての直径の変化を表している。これらの図から、低密度部ではナノワイヤの直径は根元が大きく先端に進むにつれて細くなっていることを確認した。それに対して高密度部のナノワイヤはテーパが少ないことを確認した [d6]。

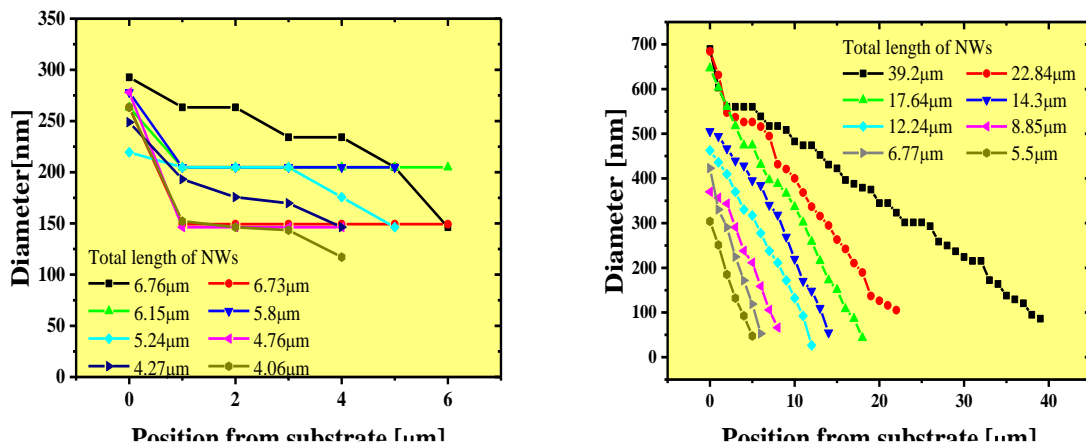


図 9：高密度部(左図)と低密度部(右図)に成長したナノワイヤのテーパの様子

3.2.2 自己触媒 InP ナノワイヤ

自己触媒 InP ナノワイヤは MOVPE により成長される。成長時の圧力を 60Torr に固定し、TMI 及び TBP を用いてナノワイヤを作製した。図 10 に成長シーケンスを示す。

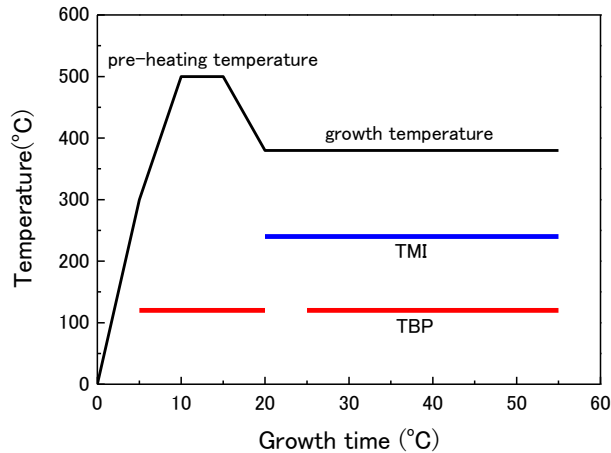


図 10： InP ナノワイヤの成長シーケンス

初期条件として、成長前基板加熱を 5min、In ドロップレット成長を 5min、InP ナノワイヤ成長を 30min に固定した。また供給量は In ドロップレット成長時の TMI を 3.0 μ mol/min、InP ナノワイヤ成長時の TMI と TBP をそれぞれ 3.0 μ mol/min、400 μ mol/min (V/III 比=133)としている。ここでは成長前基板加熱温度(380-600°C)、成長温度(320-460°C)の依存性について述べる[d2]。

(a) 成長前基板加熱温度依存性

成長前基板加熱の温度を変化させて成長した InP ナノワイヤの密度及び形状変化について考察を行った。成長条件は初期条件に加え、ナノワイヤ成長温度を 380°Cに固定し、成長前基板加熱温度を 380-600°Cと変化させて成長を行った。

図 11 に成長前基板加熱温度 500°Cで成長した InP ナノワイヤの SEM 画像を示す。成長前基板加熱温度 380°Cの条件で成長した InP ナノワイヤは、ドロップレット径 410nm、ナノワイヤ径 200nm、高さ 3.5 μ m、密度 $1.0 \times 10^6/cm^2$ とサイズが大きく低密度の成長をした。

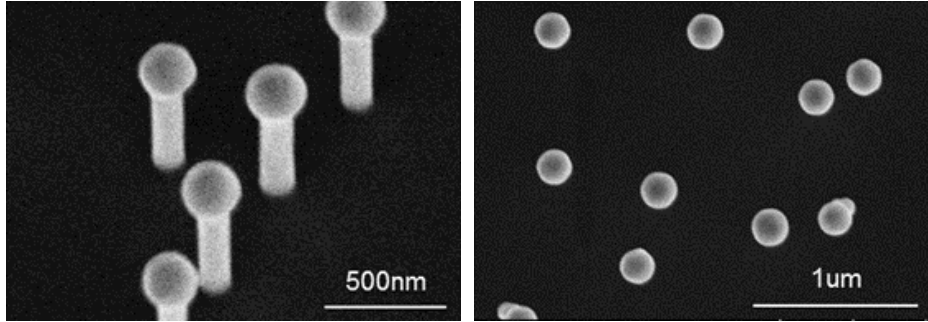


図 11： 成長前基板加熱温度 500°Cで成長した InP ナノワイヤの SEM 画像

図 12 に各成長前基板加熱温度で成長した InP ナノワイヤのドロップレット径、ナノワイヤ径、高さ及び密度の平均値、最大値、最小値を示す。平均値はナノワイヤ約 50 本を測定し、それぞれの値の平均としている。

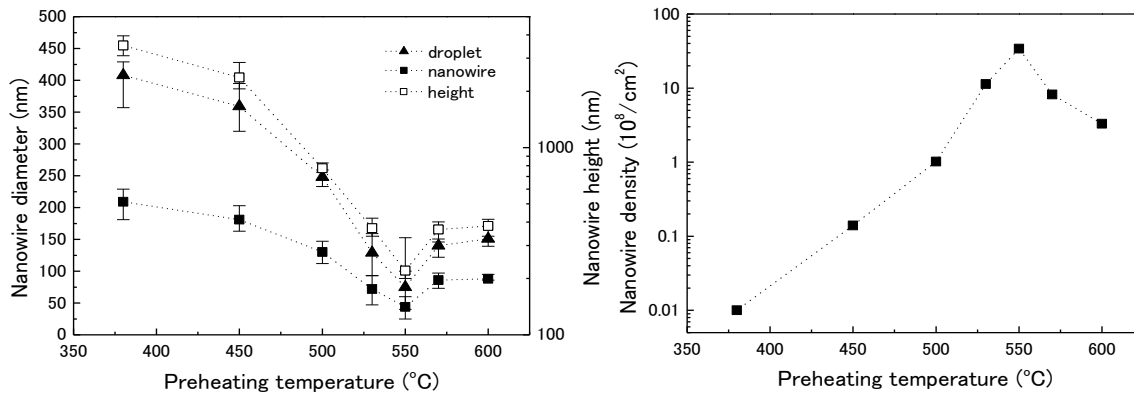


図 12： 各成長前基板加熱温度に対するドロップレット径、ナノワイヤ径、高さ、密度

成長前基板加熱の上昇に伴い、ドロップレット径は 410-80nm、ナノワイヤ径は 200-40nm、高さは 3500-290nm と減少した。また密度は 1.0×10^6 - $3.4 \times 10^9/cm^2$ と成長前基板加熱温度が 50°C増加するごとに約 10 倍の割合で増加することが分かった(380°C : $1.0 \times 10^6/cm^2$ 、450°C : $1.3 \times 10^7/cm^2$ 、500°C : $1.02 \times 10^8/cm^2$ 、550°C : $3.4 \times 10^9/cm^2$)。成長前基板加熱温度は自己触媒 InP ナノワイヤの密度に大きく影響を与えることが分かった。密度の増加に伴って各ナノワイヤに供給される原料が減少するため、直径及び高さは比例的に減少していくことが分かった。

(b) 成長温度依存性

次に、自己触媒 VLS 法による InP ナノワイヤの成長温度依存性について述べる。InP ナノワイヤ成長時の温度を 320-460°C で変化させた際の形状及び密度の変化を考察する。成長条件は初期条件に加え、成長前基板加熱温度を 550°C に固定して成長を行った。図 13 は成長温度 380°C で成長した InP ナノワイヤの SEM 画像である。

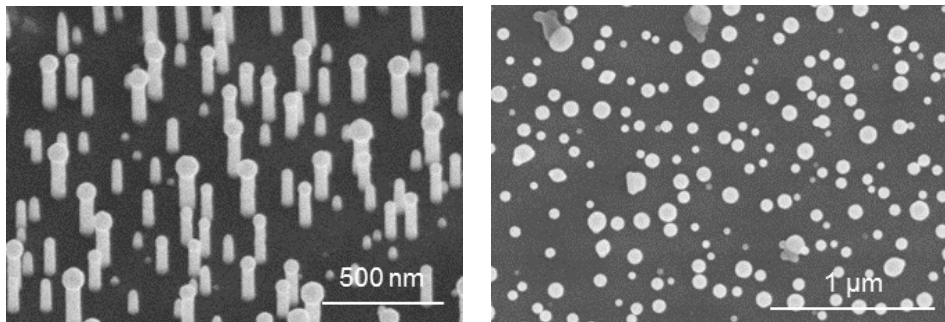


図 13： 成長温度 380°C で成長した InP ナノワイヤの SEM 画像

図 14 は各成長温度で成長した InP ナノワイヤのドロップレット径、ナノワイヤ径、高さ及び密度の平均値、最大値、最小値である。成長温度の上昇に伴い、ドロップレット径は 50-260nm、ナノワイヤ径は 30-160nm、高さは 180-780nm と増加し、密度は $6.0 \times 10^8/\text{cm}^2$ - $3.4 \times 10^9/\text{cm}^2$ の範囲で変化した。成長温度 340°C の条件にてナノワイヤ径 30nm、高さ 180nm、密度 $2.0 \times 10^9/\text{cm}^2$ とサイズが最小の InP ナノワイヤが成長し、440°C にてナノワイヤ径 160nm、高さ 780nm、密度 $6.0 \times 10^8/\text{cm}^2$ とサイズが最大の InP ナノワイヤが成長した。

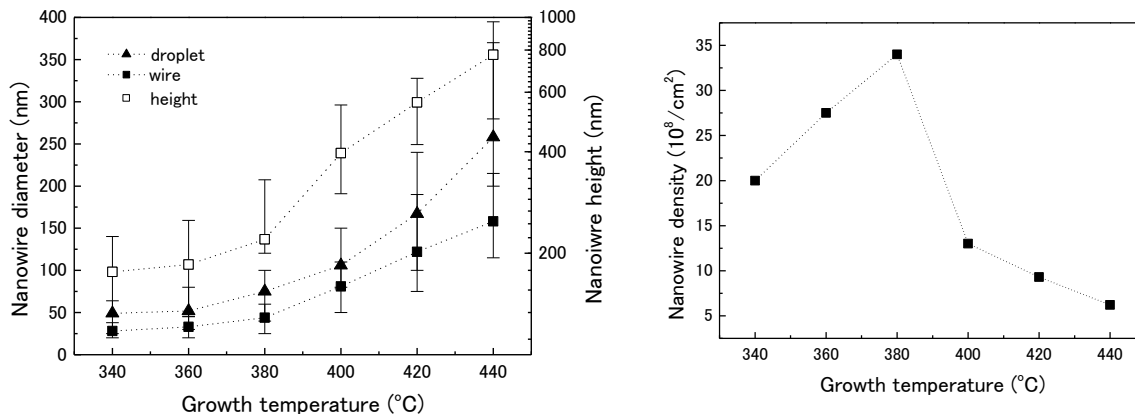


図 14： 各成長温度に対するドロップレット径、ナノワイヤ径、高さ、密度

成長温度の上昇に伴い InP ナノワイヤのサイズ及び密度が増加傾向にあったが、380°C 以降の成長では密度が下がっていった。これは基板表面上の In ドロップレットの結合係数に関係があると考えられる。温度が上昇することで基板表面上の TMI のマイグレーションが増加し、より多くの In ドロップレットが形成されやすくなる。これにより In ドロップレット同士が結合し、サイズの大きい In ドロップレットが低密度に形成されたと考察出来る。460°Cの成長では、さらに多くの In ドロップレットが結合し、肥大化した In が触媒としての機能が果たせなくなってしまう、InP 結晶化してしまったことが考えられる。

以上、自己触媒 VLS 法による InP ナノワイヤの成長条件依存性について述べた。成長前基板加熱温度、成長温度の変化による自己触媒 InP ナノワイヤの形状考察により、制御性を確立し、成長機構を明らかにすることに成功した。

3.2.3 GaInAs/InP コアマルチシェルナノワイヤ

次に自己触媒 InP ナノワイヤの周辺に活性層となる $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ シェルとバリア層となる InP シェルを形成した InP/ $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ /InP コアマルチシェルナノワイヤを成長し、光学特性の評価を行った。自己触媒 InP/ $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ /InP コアマルチシェルナノワイヤの成長シーケンスおよび構造図を図 15 に示す。コアマルチシェルナノワイヤの成長方法は自己触媒 InP ナノワイヤ成長後、成長温度を昇温し $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ シェルおよび InP シェルを形成する。

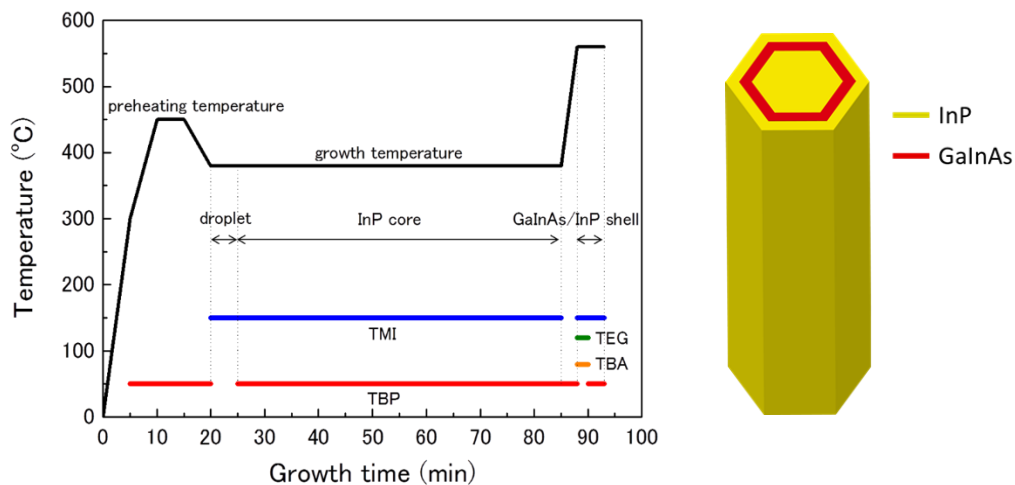


図 15： コアマルチシェルナノワイヤの成長シーケンスと構造図

初期条件として、成長前基板加熱を 5min、In ドロップレット形成を 5min、InP ナノワイヤ成長を 60min、 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ シェル成長を 10s、InP シェル成長を 1min に設定した。InP コアナノワイヤの成長は、成長前基板加熱温度 450°C 、成長温度 380°C に固定し、 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{InP}$ シェルの成長温度は 560°C で行った。供給量は、In ドロップレット成長時の TMI の流量を $3.0\mu\text{mol}/\text{min}$ 、InP ナノワイヤ成長時の TMI と TBP の流量をそれぞれ $3.0\mu\text{mol}/\text{min}$ 、 $400\mu\text{mol}/\text{min}$ としている。 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ シェル成長時の TEG、TMI、TBP の流量はそれぞれ、 $8.07\mu\text{mol}/\text{min}$ 、 $8.86\mu\text{mol}/\text{min}$ 、 $176\mu\text{mol}/\text{min}$ 、InP シェル成長時の TMI、TBP はそれぞれ $8.86\mu\text{mol}/\text{min}$ 、 $353\mu\text{mol}/\text{min}$ とした。図 16 にそれぞれの各 TMI 供給量で成長した InP/ $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{InP}$ コアマルチシェルナノワイヤの常温での PL 発光スペクトルを示した。TMI 供給量 $15.0\mu\text{mol}/\text{min}$ で成長した InP/ $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{InP}$ コアマルチシェルナノワイヤの強度を 1 とし、それぞれの TMI 供給量で成長したナノワイヤの PL 発光スペクトルを規格化している。PL 発光強度はそれぞれ TMI 供給量 $3.0\mu\text{mol}/\text{min}$ で 0.3、TMI 供給量 $6.0\mu\text{mol}/\text{min}$ で 0.46、TMI 供給量 $9.0\mu\text{mol}/\text{min}$ で 0.74、TMI 供給量 $15.0\mu\text{mol}/\text{min}$ で 1 となり、ナノワイヤの高さの増加に伴い PL 発光強度が増加した。これは各ナノワイヤに形成される $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 活性層の表面積が増加したことが原因だと考えられる。各 TMI 供給量で成長したコアマルチシェルナノワイヤの PL 発光ピーク波長はどの条件でも 1420nm 付近となり、大きな差は無かった。このことより、ナノワイヤの高さ変化によるシェル層厚への影響は無いことが分かった。半値幅 292nm のブロードな波形となったが、これは常温での発光のため光励起するエネルギー準位にバラつきが生じたことが考えられる。また TMI 供給量 $15.0\mu\text{mol}/\text{min}$ で成長した InP/ $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{InP}$ コアマルチシェルナノワイヤを InP(111)B 基板から剥離し、Si 基板上に配置させて測定した際の PL 発光スペクトルを破線で示した。剥離したコアマルチシェルナノワイヤの PL 特性は InP(111)B 基板上で測定したコアマルチシェルナノワイヤと同じピーク波長を持つスペクトルであることから、得られた PL 特性はナノワイヤ自身の発光であることが分かった[d1]。

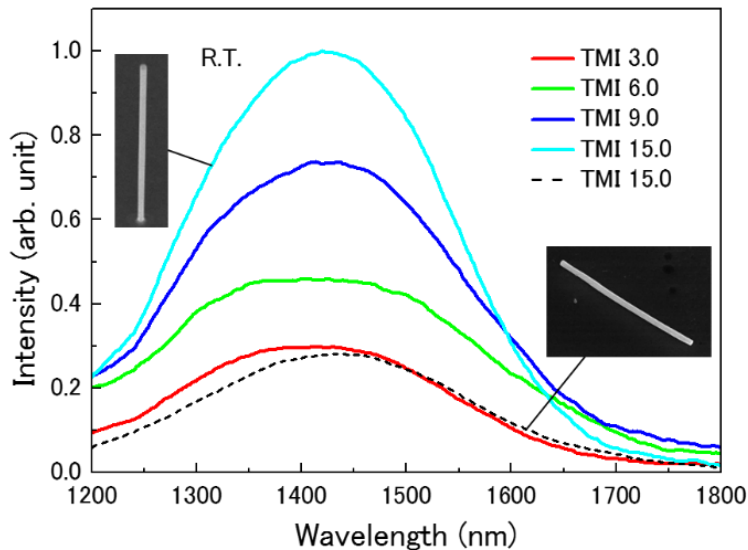


図 16： 各 TMI 供給量に対する PL スペクトル

以上、自己触媒 VLS 法による $\text{InP}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{InP}$ コアマルチシェルナノワイヤの成長に成功し、常温での PL 発光を確認することが出来た。また自己触媒 InP ナノワイヤの TMI 供給量依存性で確認した、TMI 供給量はナノワイヤの高さ方向を制御するという成長機構は、 $\text{InP}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{InP}$ コアマルチシェルナノワイヤに関しても適用され、コアマルチシェルナノワイヤの高さ方向のみを変化させることに成功した。PL 発光強度はコアマルチシェルナノワイヤの高さに依存し、高さの増加に伴い PL 発光強度が増加することが分かった。

4. まとめ

本研究プロジェクトにおいては、 InAs 量子ドットと InAs ナノワイヤ、自己触媒ナノワイヤの結晶成長とそのデバイス応用に関する研究を行った。

InAs 量子ドットの結晶成長では、選択成長とダブルキャップ法を併用した方法を開発し、これにより波長制御が可能であることを示した。そしてこの方法を応用したアレイ導波路型量子ドット LED を試作し、フラットトップ型スペクトル特性を持つ発光半値幅 500nm 以上の LED を実現した。今後はこの LED の通信、センサーへの応用、また量子ドットデバイスの新たな可能性を見出す研究を行っていく予定である。

ナノワイヤに関しては、Au 微粒子を用いた InAs ナノワイヤの成長条件を把握し、このナノワイヤは和保教授の CMOS 回路集積デバイスへ応用されており、共同研究が順調に進展した。また自己触媒 InP ナノワイヤの成長に関する研究が進展し、成長条件を把握し、さらにコアシェルナノワイヤの成長と光学特性の観測まで得られた。今後はこれらのナノワイヤをデバイス応用する研究フェーズへと発展させる予定である。

研究発表リスト

雑誌論文

- d1. T. Ogino, K. Asakura, K. Takano, T. Waho, and K. Shimomura, "Emission wavelength control of self-catalytic InP/GaInAs/InP core-multishell nanowire on InP substrate grown by MOVPE", Jpn. J. Appl. Phys., vol.55, no.3, 031201, Mar. 2016.
- d2. T.Ogino, M.Yamauchi, Y.Yamamoto, K.Shimomura, and T.Waho, "Preheating temperature and growth temperature dependence of InP nanowires grown by self-catalytic VLS mode on InP substrate", J. Crystal Growth, vol. 414, pp.161-166, Jan. 2015.
- d3. K.Matsumoto, X.Zhang, J.Kishikawa, and K.Shimomura, "Current-injected light emission of epitaxially grown InAs/InP quantum dots on directly bonded InP/Si substrate", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 54, 030208, Jan. 2015.
- d4. K. Matsumoto, R. Kobie, and K. Shimomura, "Thermal treatment for preventing void formation on directly-bonded InP/Si interface", Jpn. J. Appl. Phys., vol.53, no.11, 116502, Oct. 2014.
- d5. K. Matsumoto, T. Makino, K. Kimura, K. Shimomura, "Extremely improved InP template and GaInAsP system growth on directly- bonded InP/SiO₂-Si and InP/glass substrate", Phys. Staus Solidi C, vol.10, no.5, pp. 782-785, May 2013.
- d6. S. Murakami, H. Funayama , K. Shimomura and T. Waho, "Au-assisted growth of InAs nanowires on GaAs(111)B, GaAs(100), InP(111)B, InP(100) by MOVPE", Phys. Staus Solidi C, vol.10, no.5, pp. 761-764, May 2013.
- d7. K. Matsumoto, T. Makino, K. Kimura, and K. Shimomura, "Growth of GaInAs/InP MQW using MOVPE on directly-bonded InP/Si substrate", J. Crystal Growth, vol.370, pp.133-135, May 2013.
- d8. S. Yoshikawa, M. Yamauchi, Y. Yamamoto, and K. Shimomura, "Current injected spectrum change in flat-topped InAs/InP QDs arrayed waveguide LED with different QD heights", Phys. Staus Solidi C, vol.10, no.11, pp.1438-1441, Nov. 2013.
- d9. S. Yoshikawa, T. Saegusa, Y. Iwane, M. Yamauchi and K. Shimomura, "Flat-topped emission with spectral width above 500 nm from InAs/InP QD waveguide array light-emitting diode", Applied Physics Express, vol.5, 092103, Sept. 2012.
- d10. S. Yanagi, Y. Murakami, Y. Yamazaki and K. Shimomura, "Switching characteristics in variable index arrayed waveguides using thin film heater", IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no. 7, pp. 1265-1271, July 2012.
- d11. T. Makino, T. Tanimura, S. Yanagi, and K. Shimomura, "Numerical calculation of wavelength demultiplexed light switching using variable index arrayed waveguide", IEICE Trans. Electron., vol.E95-C, no. 7, pp. 1258-1264, July 2012.
- d12. Y. Iwane, F. Kawashima, M. Hirooka, T. Saegusa, and K. Shimomura, "InAs/InP QDs grown by selective MOVPE growth using double-cap procedure for broadband LED improved p-cladding layer", Phys. Staus Solidi C, vol.9, no.2, pp.210-213, Feb. 2012.
- d13. F. Kawashima, R. Kobie, Y. Suzuki, and K. Shimomura, "Selective MOVPE growth of InAs QDs using double-cap procedure," J. Crystal Growth, vol.318, pp.1109-1112, 2011.

図書

下村和彦、「量子ドットエレクトロニクスの最前線」、(2.2.5 分担執筆) 株式会社エヌ・

ティー・エス、426 ページ、平成 23 年 3 月

解説記事

下村和彦, 「化合物半導体と異種材料との接合技術」, *O plus E*, vol.38, no.2, pp.139-147, 平成 28 年 2 月.

学会発表

- d14. 大貫雄也, 松本恵一, 岸川純也, 西山哲央, 鎌田直樹, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上結晶成長膜の接合強度および PL 強度の圧力依存性評価」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 21p-P16-10, 平成 28 年 3 月 21 日.
- d15. 鎌田直樹, 鋤柄俊樹, 西山哲央, 大貫雄也, 松本恵一, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上 InAs 量子ドットの成長」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 21p-P16-8, 平成 28 年 3 月 21 日.
- d16. 西山哲央, 松本恵一, 岸川純也, 鋤柄俊樹, 大貫雄也, 鎌田直樹, 菅家智一, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP-InP ダブルヘテロレーザの低温発振特性」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 20p-S321-11, 平成 28 年 3 月 20 日.
- d17. 高野紘平, 荻野雄大, 朝倉啓太, 和保孝夫, 下村和彦, 「自己触媒 VLS 法による InP/GaInAs/InP アマルチシェルナノワイヤの光学特性評価」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 20p-P7-2, 平成 28 年 3 月 20 日.
- d18. 朝倉啓太, 荻野雄大, 高野紘平, 和保孝夫, 下村和彦, 「自己触媒 VLS 法による n-InP/ i-GaInAs/ p-InP コアシェルナノワイヤの電気特性評価」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 19p-W834-8, 平成 28 年 3 月 19 日.
- d19. 下村和彦, 松本恵一, 「InP/Si 直接貼付基板上への InP 系光デバイス集積化に関する研究」, 第 23 回シリコンフォトニクス研究会 (招待講演), 石川県政記念しいのき迎賓館, 金沢, 平成 27 年 12 月 10 日,
- d20. 鋤柄俊樹, 山元雄太, 西山哲央, 下村和彦, 「p 変調ドーピング InAs/InP ダブルキャップ量子ドット構造のドーピング濃度依存性」, 第 76 回応用物理学学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, 16p-2E-7, 平成 27 年 9 月 16 日.
- d21. 松本恵一, 金谷佳則, 岸川純也, 山元雄太, 鋤柄俊樹, 西山哲央, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上 MOVPE 法による GaInAsP-InP ダブルヘテロレーザの集積」, 第 76 回応用物理学学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, 16p-2E-4, 平成 27 年 9 月 16 日.

- d22. 朝倉啓太, 荻野雄大, 高野紘平, 和保孝夫, 下村和彦, 「自己触媒 VLS 法による InP/GaInAs/InP コアシェルナノワイヤの TMI 供給量依存性」, 第 76 回応用物理学学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, 15a-PB1-2, 平成 27 年 9 月 15 日.
- d23. 西山哲央, 鋤柄俊樹, 鎌田直樹, 下村和彦, 「InAs/InP ダブルキャップ量子ドットレーザの閾値電流密度共振器長依存性」, 第 76 回応用物理学学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, 14p-PA6-2, 平成 27 年 9 月 14 日.
- d24. 荻野雄大, 朝倉啓太, 高野紘平, 和保孝夫, 下村和彦, 「自己触媒 VLS 法による InP/GaInAs/InP コアシェルナノワイヤの光学特性評価」, 第 76 回応用物理学学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, 14p-2Q-3, 平成 27 年 9 月 14 日.
- d25. 岸川純也, 松本恵一, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板接合界面における電気特性評価」, 第 76 回応用物理学学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, 13p-PB2-14, 平成 27 年 9 月 13 日.
- d26. T. Sukigara, Y. Yamamoto, T. Nishiyama, and K. Shimomura, "Cavity length dependence on lasing characteristics of double-capped QDs laser", 11th Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2015), Busan, Korea, 27P-82, Aug. 27, 2015.
- d27. T. Ogino, K. Asakura, T. Waho, and K. Shimomura, "PL emission of InP/GaInAs/InP core-multishell NWs grown by self-catalytic VLS mode", 11th Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2015), Busan, Korea, 27P-48, Aug. 27, 2015.
- d28. K. Matsumoto, Y. Kanaya, J. Kishikawa, and K. Shimomura, "Characteristics of film InP layer and Si substrate bonded interface bonded by wafer direct bonding", 11th Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2015), Busan, Korea, 25J3-3, Aug. 25, 2015.
- d29. K. Matsumoto, Y. Kanaya, J. Kishikawa, Y. Yamamoto, T. Sukigara, T. Nishiyama, and K. Shimomura, "Epitaxial Grown GaInAsP-InP laser on wafer bonded InP/Si substrate", 42nd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2015), Santa Barbara, CA, USA, O6.6, July 1, 2015.
- d30. 松本恵一, 金谷佳則, 岸川純也, 下村和彦, 「直接貼付 InP 層を用いた異種基板上 III-V 族半導体発光デバイスの集積」, 電子情報通信学会技術研究報告, 機械振興会館, 東京, 平成 27 年 6 月 19 日
- d31. K. Matsumoto, M. Takasu, Y. Kanaya, J. Kishikawa, and K. Shimomura, "GaInAs/InP MQW light-emitting diode fabricated on wafer bonded InP/Quartz substrate", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2015), San Jose, CA, USA, SF2G.5, May 15, 2015.
- d32. 下村和彦, 「InAs 量子ドット LED の発光波長制御に関する検討」, 映像情報メディア学会情報ディスプレイ研究会, vol. 39, no. 12, pp.15-20, 平成 27 年 3 月 13 日.
- d33. 朝倉啓太, 荻野雄大, 下村和彦, 和保孝夫, 「自己触媒 VLS 法による InP ナノワイヤの TMI 供給量依存性」, 第 62 回応用物理学学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 13p-P12-4, 平成 27 年 3 月 12 日.
- d34. 岸川純也, 松本恵一, 金谷佳則, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板における接合状態評価」, 第 62 回応用物理学学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 12p-A17-13, 平成

27年3月12日.

- d35. 松本恵一, 高巢誠, 金谷佳則, 岸川純也, 下村 和彦, 「直接貼付 InP/Quartz 基板上 GaInAs/InP MQW LED の電流注入動作」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 12p-A17-12, 平成 27 年 3 月 12 日.
- d36. 鋤柄俊樹, 山元雄太, 西山哲央, 下村和彦, 「p 変調ドープ InAs/InP ダブルキャップ量子ドット構造の電流注入特性」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 12p-A17-6, 平成 27 年 3 月 12 日.
- d37. 荻野雄大, 朝倉啓太, 下村和彦, 和保孝夫, 「自己触媒 VLS 法による InP/GaInAs/InP コアシェルナノワイヤの成長」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 12a-A20-10, 平成 27 年 3 月 12 日.
- d38. 岸川純也, 松本恵一, 金谷佳則, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Glass 基板上選択 MOVPE 成長により形成された InP 系導波路の断面形状評価」, 第 75 回応用物理学学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 19p-PB5-16, 平成 26 年 9 月 19 日
- d39. 金谷佳則, 松本恵一, 岸川純也, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板接合界面におけるボイドによる電気特性への影響」, 第 75 回応用物理学学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 19p-PB5-10, 平成 26 年 9 月 19 日
- d40. 鋤柄俊樹, 山元雄太, 西山哲央, 下村和彦, 「集光導波路構造を導入したアレイ導波路型 InAs 量子ドット LED の検討」, 第 75 回応用物理学学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 19a-PA8-1, 平成 26 年 9 月 19 日
- d41. 松本恵一, 金谷佳則, 岸川純也, 下村和彦, 「直接貼付 InP/SiO₂ 接合界面におけるボイド占有率の評価」, 第 75 回応用物理学学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 18a-A19-12, 平成 26 年 9 月 18 日
- d42. 荻野雄大, 朝倉啓太, 下村和彦, 和保孝夫, 「自己触媒 VLS 法による InP ナノワイヤの成長前基板温度依存性」, 第 75 回応用物理学学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 18a-A6-5, 平成 26 年 9 月 18 日
- d43. 下村和彦, 「選択成長とダブルキャップ法を用いたアレイ導波路型 InAs 量子ドット LED の広帯域化」(招待講演), 応用物理学会, 応用電子物性分科会 研究例会, 首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス, 平成 26 年 7 月 30 日.
- d44. K. Matsumoto, Y. Kanaya, J. Kishikawa and K. Shimomura, "Epitaxial growth of GaInAsP system on wafer-bonded InP/Si substrate", 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D 2014), Tokyo, Japan, July 16, 2014.
- d45. T.Ogino, M.Yamauchi, Y.Yamamoto, K.Shimomura, and T.Waho, "Growth temperature and pre-heating temperature dependence of InP nanowires grown by self-catalytic VLS mode", 17th International Conference on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy (ICMOVPE XVII), Lausanne, Switzerland, Wed-Poster-2-32, July 16, 2014.

- d46. K. Matsumoto, Y. Kanaya, J. Kishikawa and K. Shimomura, "Selective MOVPE grown GaInAs/InP MQW demonstrated on directly-bonded InP/SiO₂-Si, Glass and Quartz substrate", 17th International Conference on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy (ICMOVPE XVII), Lausanne, Switzerland, Wed-Oral-3-6, July 16, 2014.
- d47. 松本恵一, 金谷佳則, 岸川純也, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上量子ドット LED から
の EL 発光」, 電子情報通信学会技術研究報告, 機械振興会館, 東京, OPE2014-15, 平成 26
年 6 月 20 日.
- d48. X. Zhang, K. Matsumoto, Y. Kanaya and K. Shimomura, "First demonstration of directly
epitaxial grown QDs LED on wafer bonded InP/Si substrate", 41st International Symposium on
Compound Semiconductors (ISCS 2014), Montpellier, France, Tu-D1-3, May 13, 2014.
- d49. T. Sukigara, S. Yoshikawa, M. Yamauchi, Y. Yamamoto, and K. Shimomura, "EL spectrum
with various core structure in broadband InAs QDs LED", 41st International Symposium on
Compound Semiconductors (ISCS 2014), Montpellier, France, P60, May 12, 2014.
- d50. 金谷佳則, 松本恵一, 小冷亮太, 岸川純也, 下村和彦, 「直接貼付 InP/GaAs 基板上 GaInAsP
系 MOVPE 成長」, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学相模原キャンパス,
18p-PG6-6, 平成 26 年 3 月 18 日
- d51. 岸川純也, 松本恵一, Zhang Xinxin, 金谷佳則, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上 InAs 積
層量子ドット構造」, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学相模原キャン
パス, 18p-PG6-5, 平成 26 年 3 月 18 日
- d52. 荻野雄大, 山内雅之, 山元雄太, 下村和彦, 和保孝夫, 「自己触媒 VLS 法による InP ナノ
ワイヤの成長温度依存性」, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学相模原キ
ャンパス, 18p-PG6-3, 平成 26 年 3 月 18 日
- d53. 松本恵一, 小冷亮太, 岸川純也, 下村和彦, 「Si 基板上直接貼付 InP 層の平坦性向上」,
第 61 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 18a-E11-7, 平成 26
年 3 月 18 日
- d54. 鋤柄俊樹, 吉川翔平, 山内雅之, 山元雄太, 下村和彦, 「InAs 積層量子ドット LED におけ
る各層のピーク波長制御による広帯域化」, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 青山学
院大学相模原キャンパス, 17p-PA2-3, 平成 26 年 3 月 17 日
- d55. 山元雄太, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「p-変調ドープ InAs/InP 量子ドット構造
の EL 特性」, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 17p-
PA2-2, 平成 26 年 3 月 17 日
- d56. S. Yoshikawa, M. Yamauchi, Y. Yamamoto, and K. Shimomura, "Current injected spectrum
change in flat-topped InAs/InP QDs arrayed waveguide LED with different QD heights", Phys.
Staus Solidi C, vol.10, no.11, pp.1438-1441, Nov. 2013.
- d57. K. Matsumoto, X. Zhang, Y. Kanaya, and K. Shimomura, "Selective MOVPE growth of
GaInAs/InP MQW on directly-bonded InP/Si substrate", Phys. Staus Solidi C, vol.10, no.11,
pp.1357-1360, Nov. 2013.
- d58. 金谷佳則, 松本恵一, Zhang Xinxin, 下村和彦, 「GaInAsP 系結晶再成長のための直接貼付

- InP/Si 基板接合界面における電気特性評価」, 第 74 回応用物理学学術講演会, 同志社大学, 19a-P8-16, 平成 25 年 9 月 19 日
- d59. 松本恵一, Zhang Xinxin, 金谷佳則, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAs/InP MQW 構造選択 MOVPE における PL 波長シフト」, 第 74 回応用物理学学術講演会, 同志社大学, 19a-P8-12, 平成 25 年 9 月 19 日
- d60. 山元雄太, 山内雅之, 吉川翔平, 鋤柄俊樹, 下村和彦, 「3 元, 4 元キャップ層による InAs/InP 量子ドットの長波長発光」, 第 74 回応用物理学学術講演会, 同志社大学, 19a-P8-2, 平成 25 年 9 月 19 日
- d61. 山内雅之, 吉川翔平, 山元雄太, 下村和彦, 「MOVPE による Ga 間欠供給 GaInAs 量子ドットの発光特性」, 第 74 回応用物理学学術講演会, 同志社大学, 19a-P8-1, 平成 25 年 9 月 19 日
- d62. 吉川翔平, 山内雅之, 山元雄太, 下村和彦, 「InAs 積層量子ドット LED の注入電流に対する各層の発光特性の評価」, 第 74 回応用物理学学術講演会, 同志社大学, 19a-P2-2, 平成 25 年 9 月 19 日
- d63. 松本 恵一, 張 きんきん, 金谷 佳則, 下村 和彦, 「直接貼付 InP テンプレートを用いた異種基板上 MOVPE 結晶成長」, 電子情報通信学会技術研究報告, OPE2013-9, 平成 25 年 6 月 21 日
- d64. K. Matsumoto, X. Zhang, Y. Kanaya, and K. Shimomura, "Selective MOVPE growth of GaInAs/InP MQW on directly-bonded InP/Si substrate", 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe, Japan, WeB2-3, May 22, 2013.
- d65. S. Yoshikawa, T. Saegusa, Y. Iwane, M. Yamauchi, and K. Shimomura, "Broadband and flat-topped spectrum of InAs/InP QDs arrayed waveguide LED", 40th International Symposium on Compound Semiconductors, Kobe, Japan, TuC1-6, May 21, 2013.
- d66. M. Yamauchi, Y. Iwane, S. Yoshikawa, Y. Yamamoto, and K. Shimomura, "Wide energy level control of InAs QDs using double-capping procedure by MOVPE", 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Kobe, Japan, MoPI-5, May 20, 2013.
- d67. K. Matsumoto, X. Zhang, Y. Kanaya, and K. Shimomura, "MOVPE growth of InAs/InP QDs on directlybonded InP/Si substrate", 25th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Kobe, Japan, MoD4-2, May 20, 2013.
- d68. 松本恵一, Xinxin Zhang, 金谷佳則, 下村和彦, 「直接貼付 InP/glass 基板における GaInAs/InP 層の MOVPE 結晶成長」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 29a-PB7-14, 平成 25 年 3 月 29 日
- d69. 山内雅之, 村上新, 松本恵一, 船山裕晃, 下村和彦, 和保孝夫, 「MOVPE による低テーパーを目指した InAs ナノワイヤの VLS 成長」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 29a-PB7-11, 平成 25 年 3 月 29 日
- d70. Xinxin Zhang, 松本恵一, 金谷佳則, 山内雅之, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上への Ga_{0.2}In_{0.8}As 量子ドット成長」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 29a-PB7-3, 平成 25 年 3 月 29 日
- d71. 山元雄太, 岩根優人, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「InAs 供給量増加による

- InAs/InP ダブルキャップ量子ドットの長波長発光」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 29a-PB7-1, 平成 25 年 3 月 29 日
- d72. 吉川翔平, 三枝知充, 岩根優人, 山内雅之, 下村和彦, 「選択成長およびダブルキャップ法を用いた InAs 量子ドットアレイ LED のフラットトップスペクトル」, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 29p-B4-9, 平成 25 年 3 月 29 日
- d73. 三枝知充, 岩根優人, 吉田圭佑, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「選択成長およびダブルキャップ法を用いた InAs 量子ドットアレイ LED の PL 特性」, 第 73 回応用物理学学術講演会, 愛媛大学, 13a-PA8-4, 平成 24 年 9 月 13 日
- d74. 松本恵一, 牧野辰則, 喜村勝矢, 下村和彦, 「直接貼付 InP/SiO₂-Si 基板上における MOVPE 結晶成長表面の面粗さ測定」, 第 73 回応用物理学学術講演会, 愛媛大学, 12p-PB11-17, 平成 24 年 9 月 12 日
- d75. 岩根優人, 三枝知充, 吉田圭佑, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「ファーストキャップ層厚変化による InAs/InP ダブルキャップ量子ドットの長波長発光」, 第 73 回応用物理学学術講演会, 愛媛大学, 12p-PB11-13, 平成 24 年 9 月 12 日
- d76. 村上新, 船山裕晃, 下村和彦, 和保孝夫, 「Au 微粒子を用いた GaAs(111)B 基板上 InAs ナノワイヤの V/III 比依存性」, 第 73 回応用物理学学術講演会, 愛媛大学, 12p-PB11-7, 平成 24 年 9 月 12 日
- d77. 吉川翔平, 三枝知充, 岩根優人, 下村和彦, 「MOVPE 選択成長およびダブルキャップ法を用いたアレイ導波路型 InAs 量子ドット LED のスペクトル特性」, 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山大学, C-4-26, 平成 24 年 9 月 12 日
- d78. 柳智史, 吉岡政洋, 下村和彦, 「電界効果 GaInAs/InP MQW アレイ導波路型波長スイッチの動作特性と解析」, 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 富山大学, C-3-5, 平成 24 年 9 月 11 日
- d79. K. Matsumoto, T. Makino, K. Kimura and K. Shimomura, "GaInAsP system growth on InP/SiO₂-Si and SiO₂ templates fabricated by direct wafer bonding", 39th International Symposium on Compound Semiconductors, Santa Barbara, CA, USA, Mo-P.13, Aug. 27, 2012.
- d80. S. Murakami, A. Funayama, K. Shimomura and T. Waho, "Au-assisted growth of InAs nanowires on GaAs(111)B, GaAs(100), InP(111)B, InP(100) by MOVPE", 39th International Symposium on Compound Semiconductors, Santa Barbara, CA, USA, Mo-1A.3, Aug. 27, 2012.
- d81. Y. Iwane, T. Saegusa, K. Yoshida, M. Yamauchi, S. Yoshikawa, and K. Shimomura, "V/III ratio of Ga_{0.7}In_{0.3}As buffer layer dependence on InAs/InP QDs structure", 16th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XVI), Busan, Korea, WeP049, May 23, 2012.
- d82. K. Matsumoto, T. Makino, K. Kimura, and K. Shimomura, "GaInAs/InP MOVPE growth on directly bonded InP/Si substrate", 16th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XVI), Busan, Korea, MoB2-4, May 21, 2012.
- d83. 柳智史, 青柳孝典, 谷村昂, 下村和彦, 「電界効果 GaInAs/InP MQW 波長スイッチの電極構造改善」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 17p-F4-18, 平成 24 年 3 月 17 日
- d84. 岩根優人, 三枝知充, 吉田圭佑, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「Ga_{0.9}In_{0.1}As バッファ層を用いた InAs/InP 量子ドットの発光特性」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 17p-DP3-18, 平成 24 年 3 月 17 日
- d85. 松本恵一, 牧野辰則, 喜村勝矢, 下村和彦, 「直接貼付 InP/Si 基板上における GaInAs/InP 系 MOVPE 結晶成長」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学,

- 17p-DP3-7, 平成 24 年 3 月 17 日
- d86. 青柳 孝典, 吉岡 政洋, 柳 智史, 下村和彦, 「GaInAs/InP MQW 選択成長アレイ導波路のキャリア注入時の屈折率変化量」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 18a-GP4-9, 平成 24 年 3 月 18 日
- d87. 三枝知充, 岩根優人, 吉田圭佑, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「3 層 InAs 量子ドットアレイ LED の EL スペクトルの解析」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 17p-GP12-5, 平成 24 年 3 月 17 日
- d88. 村上 新, 船山 裕晃, 下村 和彦, 和保 孝夫, 「GaAs(111)B, GaAs(100), InP(111)B, InP(100) 基板における Au 微粒子を用いた InAs ナノワイヤ成長」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 16p-GP6-6, 平成 24 年 3 月 16 日
- d89. K. Shimomura, "Broadband QDs array LED using selective MOVPE growth," BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T, Dalian, China, Track 2-2, p.243 (Invited), Oct. 23, 2011.
- d90. 山崎勇輝, 村上洋介, 下村和彦, 「ヒーター長変化による GaInAs/InP MQW 波長光スイッチのスイッチング特性」, 第 72 回応用物理学学術講演会, 山形大学, 1a-ZL-7, 平成 23 年 9 月 1 日
- d91. 三枝知充, 岩根優人, 吉田圭佑, 山内雅之, 吉川翔平, 下村和彦, 「選択成長 3 層 InAs 量子ドットアレイ LED の PL スペクトルの解析」, 第 72 回応用物理学学術講演会, 山形大学, 31p-ZN-11, 平成 23 年 8 月 31 日
- d92. 柳智史, 青柳孝典, 谷村昂, 下村和彦, 「電界効果 GaInAs/InP MQW 波長スイッチの 2 ポート間スイッチング特性」, 第 72 回応用物理学学術講演会, 山形大学, 31p-ZN-10, 平成 23 年 8 月 31 日
- d93. T. Aoyagi, T. Tanimura, S. Yanagi, Y. Yamazaki and K. Shimomura, "Wavelength demultiplexing and carrier induced switching in variable index arrayed waveguides", 16th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2011), Kaohsiung, Taiwan 7P3_098, July 2011.
- d94. T. Makino, T. Tanimura, S. Yanagi, and K. Shimomura, "Random switching of wavelength demultiplexed light in variable arrayed waveguide," 16th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2011), Kaohsiung, Taiwan 7P3_097, July 2011.
- d95. S. Yanagi, Y. Murakami, T. Aoyagi, Y. Yamazaki and K. Shimomura, "Switching characteristics in variable index arrayed waveguides using triangular heater", 16th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2011), Kaohsiung, Taiwan 7E2_3, July 2011.
- d96. M. Hirooka, F. Kawashima, Y. Iwane, T. Saegusa, and K. Shimomura, "Strain control using GaIn_{1-x}As second cap layer during double-cap procedure in InAs / InP QDs structure", 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2011), Berlin, Germany, P19, May 2011.
- d97. Y. Iwane, F. Kawashima, M. Hirooka, T. Saegusa, and K. Shimomura, "InAs/InP QDs grown by selective MOVPE growth using double-cap procedure for broadband LED improved p-cladding layer", 38th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2011), Berlin, Germany, P3.22, May 2011.