

報道機関 各位

国立大学法人 電気通信大学

## シリコン基板上に高密度・高均一の III-V 族半導体量子ナノワイヤーを作製

### 【ポイント】

- \* InAs 量子ナノワイヤーの Si 基板上への作製に成功
- \* 従来比 10 倍以上の高密度、標準偏差 10% 以下の高均一化を実現
- \* 量子サイズ効果を確認
- \* 次世代の量子デバイスへの応用に期待

### 【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻の山口浩一教授らの研究グループは、従来よりも 10 倍以上の高い密度で、かつ細線直径の標準偏差<sup>[1]</sup>が 10% 以下の高均一な InAs（インジウムヒ素）量子ナノワイヤー<sup>[2]</sup>（量子細線）を Si（シリコン）基板上に作製する技術を開発しました。本研究で開発した成長技術により、量子ナノワイヤー内に量子ドット<sup>[3]</sup>構造を内蔵した新しい量子ナノデバイスなどへの展開が期待されます。

半導体量子ナノワイヤーは、次世代の縦型トランジスタやメモリーに加え、量子細線レーザーなどの光電子デバイスの超集積化や高効率の量子構造太陽電池、高感度・高密度の量子ナノセンサーなどさまざまなデバイスへの応用が見通されています。しかし、高密度で高均一な量子ナノワイヤー構造の作製は難しく、高度な結晶成長技術の開発が求められていました。

本研究では、分子線エピタキシー（MBE）法<sup>[4]</sup>により、Si 基板表面の酸化膜に Ga（ガリウム）のナノ液滴を堆積させ、基板の加熱による反応過程を経てナノメートル（nm、ナノは 10 億分の 1）サイズのピンホール<sup>[5]</sup>を形成しました。この酸化膜のピンホール底の Si 基板結晶から InAs 単結晶核を形成し、高さ方向に成長した InAs ナノワイヤーが高密度かつ高均一に形成されていることを確認しました。従来のナノワイヤーに比べて 10 倍から 100 倍の高い密度で、さらに量子サイズ効果<sup>[6]</sup>を発現する量子ナノワイヤーを高均一（標準偏差 8.8%）に作製することができました。次世代の多様な量子ナノデバイスを構成する量子ナノワイヤーの高品質な作製技術として、幅広い応用が見込まれます。

成果は米国物理学協会が発行する応用物理学に関する学術雑誌 Journal of Applied Physics に掲載されました。

### 【背景】

半導体量子ナノ構造の結晶成長技術の進展により、将来の光デバイス応用の新展開に大きな期待が寄せられています。特に半導体を直径数十 nm～数百 nm の柱状に成長させた半導体ナノワイヤーは、次世代の縦型トランジスタやメモリーのほか、量子ナノセンサーや量子細線レーザー、量子構造太陽電池などの光電子デバイスへの応用が見込まれています。その中でも、InAs などの III-V 族半導体はその特異な光電子物性から、デバイスの高機能化に貢献すると期待されています。

このような高機能な次世代デバイスに量子ナノワイヤーを応用するには、量子ナノワイヤーのサイズ制御や高密度化などの基盤技術が必要になります。しかしながら、従来の多くのナノワイヤー成長では、サイズが直径 100 nm～数百 nm と比較的大きいものが多く、電子の量子閉じ込め効果が十分ではありませんでした。量子サイズ効果を発現させるには、InAs ナノワイヤーの直径を 40 nm 以下に制御して作製する必要があり、さらにこの微小な量子ナノワイヤー構造を高密度かつ高均一に作製する高品質な結晶成長技術が求められていました。

### 【手法・成果】

今回、高密度で高均一な量子ナノワイヤー構造の作製に向けて、MBE 法を使い、Si 基板表面の酸化膜に Ga ナノ液滴を堆積し、基板加熱による反応過程によってナノメートルサイズのピンホールを形成する手法を用いました。この際、Ga 液滴の供給量や反応温度、Si 酸化膜表面の清浄化が重要になります。特に酸化膜表面の清浄化については、電子線の照射による表面への炭素などの吸着がピンホールの形成を阻害することが分かりました。このことから、表面構造の観察に用いる電子線照射や、表面パターン形成のための電子線照射などのプロセスは避ける必要があることを明らかにしました。

このようにして Si 酸化膜に高品質なピンホールを作製した上で、ピンホール底の Si 基板結晶から InAs 単結晶核を形成し、高さ方向の成長が促進された六方晶（ウルツ鉱構造）の InAs ナノワイヤーを高密度かつ高均一に形成しました。

結晶成長実験では、面内密度が  $1\sim 2\times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$  の InAs ナノワイヤーが再現性高く得られ、従来のナノワイヤーの 10 倍から 100 倍の高い密度で形成できました。また、ナノワイヤー構造以外の堆積物や多結晶粒の形成も抑制できることから、直径 30 nm 以下の細いナノワイヤー構造を制御性高く作製することが可能になり、これによって量子サイズ効果を発現する量子ナノワイヤーを標準偏差 8.8% と高均一に作製することに成功しました。

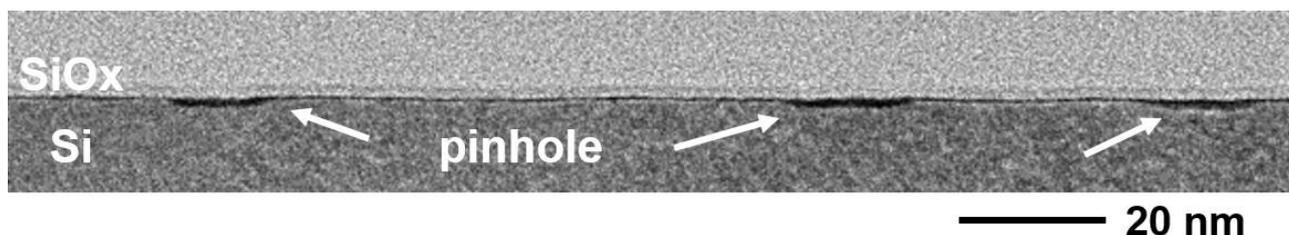


図 1 Si 基板表面の Si 酸化膜に形成したピンホール（断面で観察した透過型電子顕微鏡像）

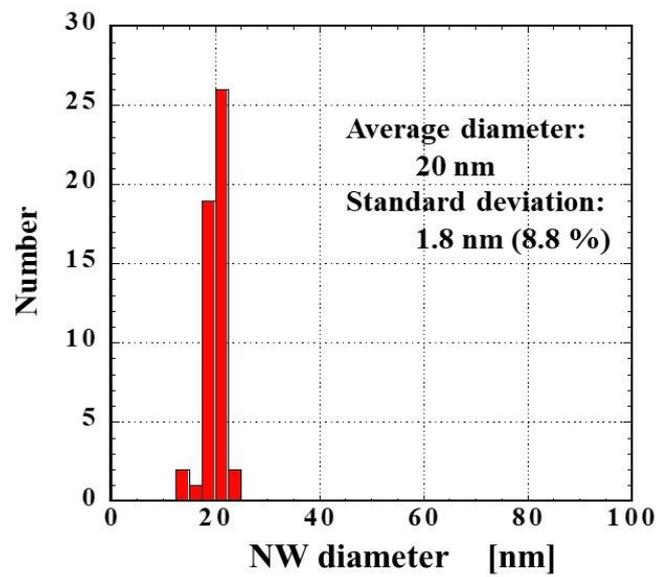
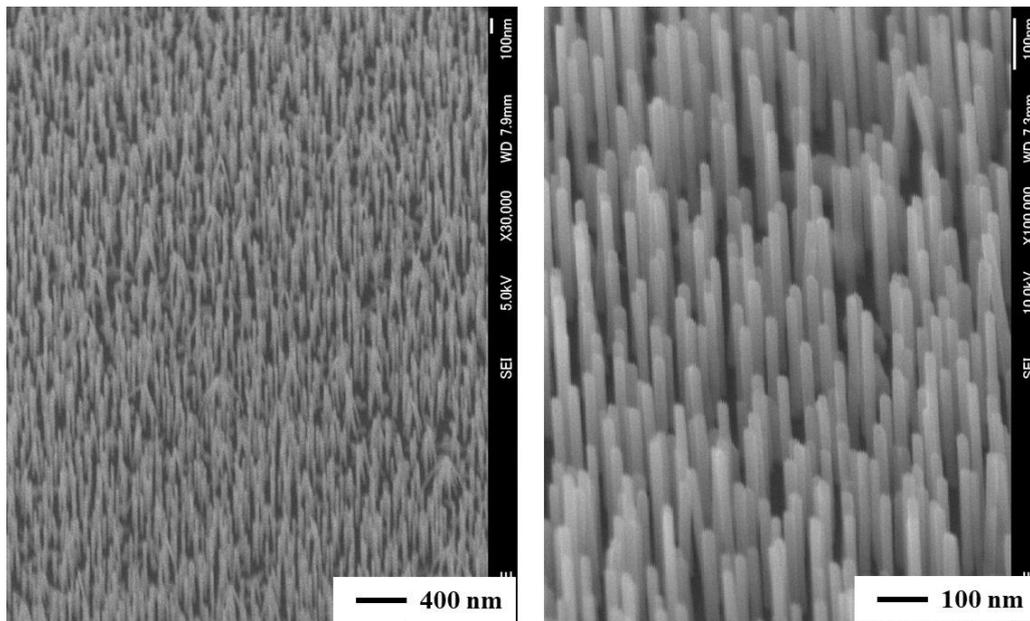


図2 高密度・高均一のInAs量子ナノワイヤー（走査型電子顕微鏡像、上）とInAs量子ナノワイヤー直径のヒストグラム（下）  
平均直径 20 nm、標準偏差 1.8 nm (8.8%)

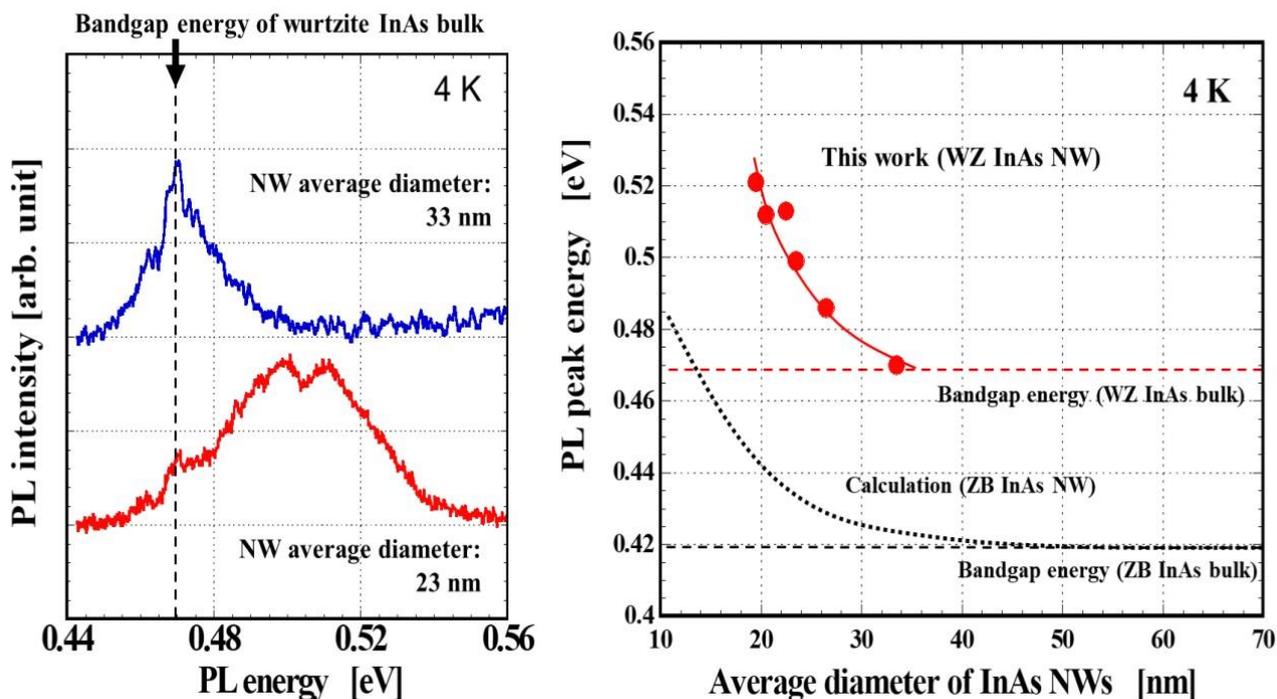


図3 直径の異なる InAs ナノワイヤーの発光スペクトル（左）と、InAs ナノワイヤー直径と発光ピークエネルギーの関係（WZ：ウルツ鉱構造，ZB：閃亜鉛鉱構造）（右）  
量子サイズ効果によってバルク結晶よりも発光エネルギーは高エネルギー化し、量子ナノワイヤーの直径を変化させることにより発光エネルギーを制御できる

### 【今後の期待】

高密度で高均一な半導体量子ナノワイヤーが Si 基板上に作製できたことで、Si 基板に集積する次世代の縦型トランジスタやメモリーのほか、量子ドット構造を内蔵した量子細線レーザーや量子構造太陽電池、量子ナノセンサーなどの量子デバイスの高機能化や超集積化が可能になると期待されます。

今後は、異種半導体結晶のヘテロ接合を導入したコア・シェル構造の量子ナノワイヤーや量子ドットナノワイヤーの作製を行い、量子デバイス応用について検討する予定です。

### （論文情報）

雑誌名：「Journal of Applied Physics」 Vol.134, (2023) 154302.

論文タイトル：High-density and high-uniformity InAs quantum nanowires on Si(111) substrates

著者：R. Nakagawa, R. Watanabe, N. Miyashita, and K. Yamaguchi

DOI 番号：10.1063/5.0156299

### （用語説明）

[1] 標準偏差：データや確率変数の平均値からの散らばり具合（ばらつき）を表す指標の一つ

[2] 半導体量子ナノワイヤー：半導体の細線構造で、細線の直径が電子の波長以下（数 nm～数十 nm）程度の柱状に成長させた 2 次元的な量子閉じ込め構造。量子細線とも呼ばれる

[3] 量子ドット：数 nm～数十 nm サイズの微小 3 次元構造に電子を量子閉じ込めした構造で、原子内の電子のような振舞いを示すことから人工原子とも呼ばれる

[4]分子線エピタキシー法：超高真空の容器内で、加熱した基板上に高純度の成長原料を分子ビーム状にして照射させ、単結晶薄膜を成長させる方法

[5]ピンホール：Si基板表面上の薄い酸化膜に形成されたナノメートルサイズの穴のこと

[6]量子サイズ効果：電子の波長以下程度の微小な半導体結晶内に電子を閉じ込めることで、電子の波長よりも十分大きなバルク結晶内の電子の振舞いと異なる性質が現われる効果。例えば、電子のエネルギー状態が離散化（量子化）されて量子準位となり、その量子サイズによって量子準位が変化する効果

#### 【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻

【職名】教授

【氏名】山口 浩一

Tel : 042-443-5149 E-Mail : koyamaguchi@uec.ac.jp

<報道に関すること>

電気通信大学総務部総務企画課 広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp