

高機能トンネル電子デバイスと その応用に関する研究

代表者： 水柿 義直（電子工学科 助教授）

メンバー： 生田目洋子、根本裕次、波木井秀充、水田 元紀
（電子工学専攻 M2）

柏竜太、河合章生、山本和政、滝口将志
（電子工学科 B4）

高機能トンネル電子デバイスとは

- 超伝導電子(クーパー対)のトンネリング
 - 巨視的量子波導関数で記述される超伝導電子のトンネリング
 - 基本となる物理: 超伝導、磁束量子化、ジョセフソン効果
 - 研究内容: 超伝導体トンネル接合を用いたデバイスと回路
 - 特徴: 超高速、超低消費電力、超高感度、超高精度
- 電子1個ずつのトンネリング
 - 電子1個のレベルで電子のトンネリングを制御
 - 基本となる物理: クーロン・ブロッキング、スピン依存伝導
 - 研究内容: 微小トンネル接合を用いたデバイスと回路
 - 特徴: 超高密度、超低消費電力、超高感度、超高精度
- 自己組織化プロセスを利用したナノ構造体の作製
 - 研究内容: 陽極酸化アルミナ細孔配列と機能性材料埋めこみ
 - 研究内容: 微小電子デバイス(ナノデバイス)への応用

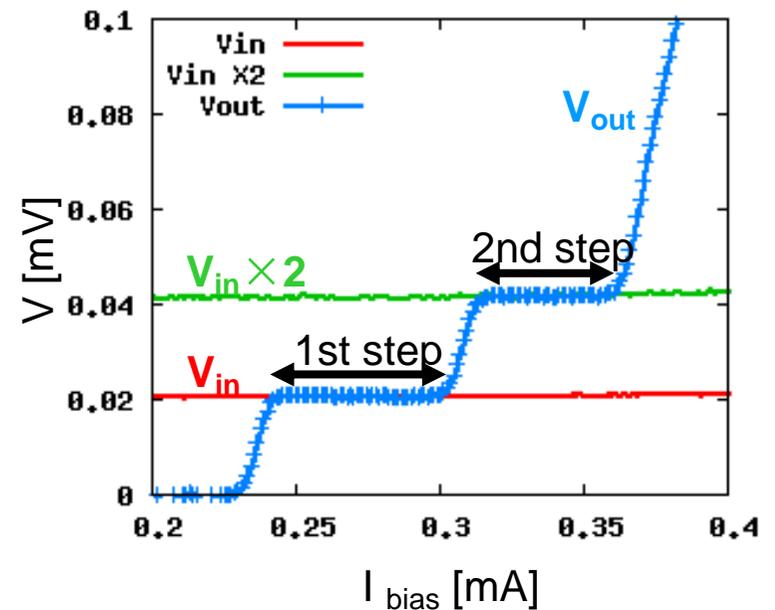
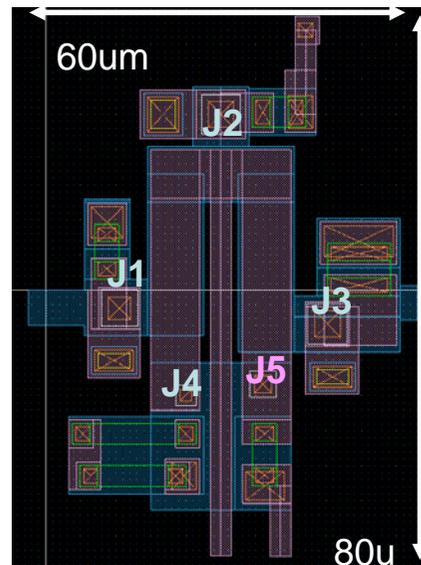
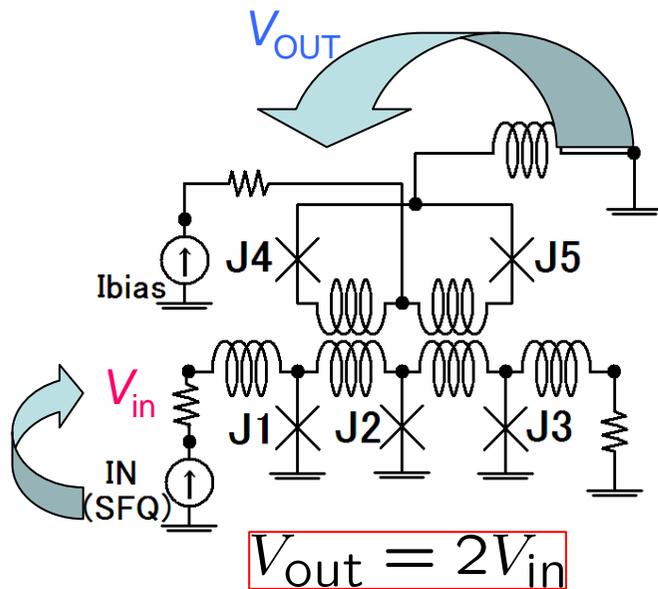
高精度ジョセフソン電圧増倍器の動作実証

交流ジョセフソン効果 → 電圧が周波数だけで決まる (材料を問わない)

$$V = n\Phi_0 f$$

↓
電圧標準、高精度D/A変換 → 高精度電圧増幅

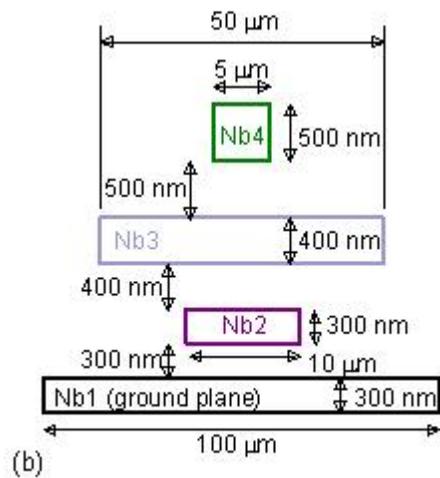
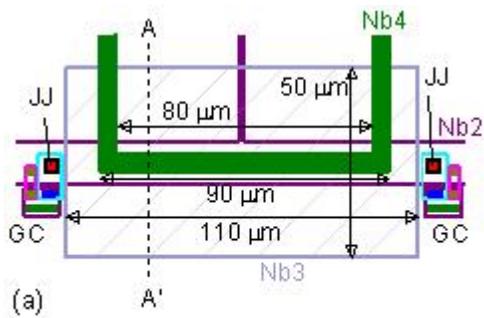
- 単一磁束量子 (SFQ) 回路による電圧2倍回路を設計し、その動作実証を行った。



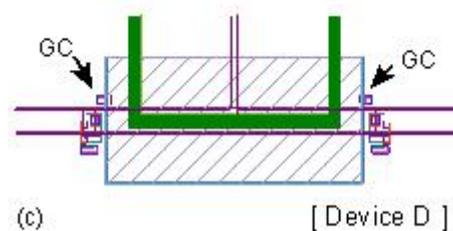
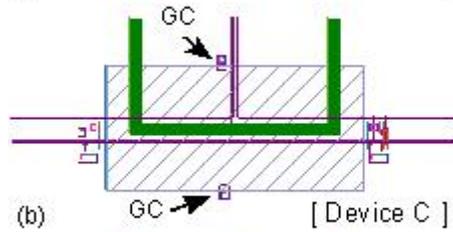
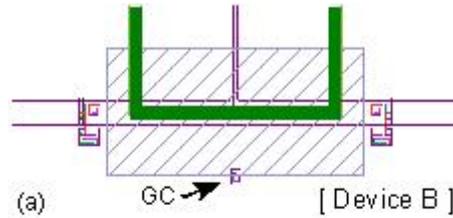
1セルで電圧を高精度に2倍する電圧2倍回路 Voltage Doubler

超伝導集積回路内磁気シールド構造

- 超伝導集積回路内での磁気シールド構造について、超伝導シールド層の接地箇所とシールド効果の関係を見出した。



基本構造(接地無)
[Device A]



接地(GC)位置
[Device B-D]

実験結果および数値計算結果

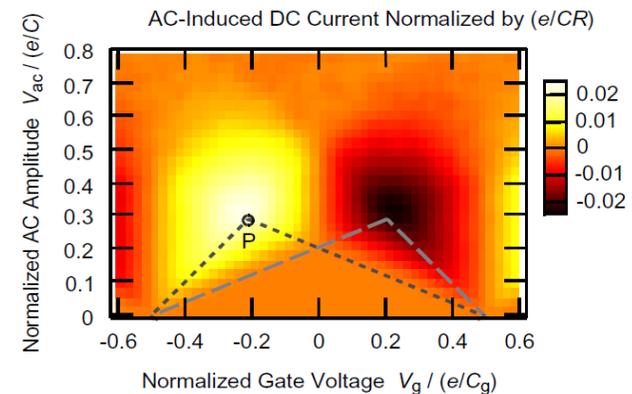
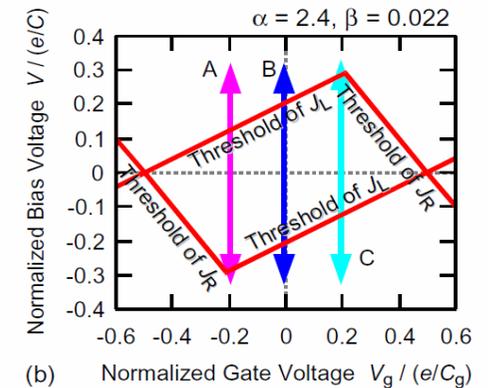
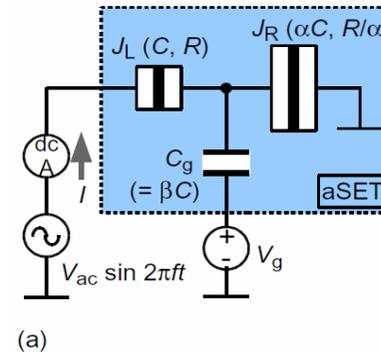
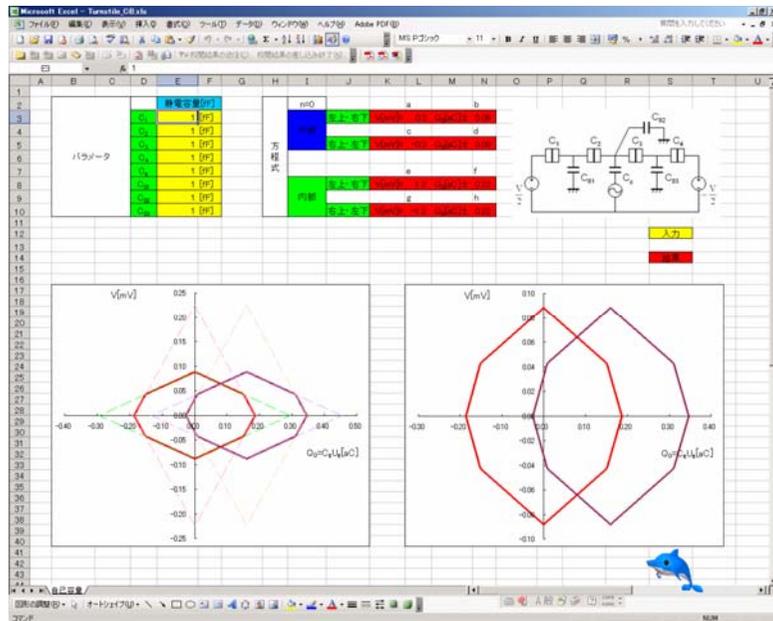
	Device			
	A	B	C	D
experimental M (pH)	0.97	0.98	0.98	0.32
(std. devia. σ)	(0.095)	(0.094)	(0.049)	(0.032)
numerical M (pH)	1.0	1.0	1.0	0.38
numerical L_{Nb2} (pH)	5.3	5.3	5.3	4.8
numerical L_{Nb4} (pH)	12	12	12	11
coupling coeffi. k	0.12	0.12	0.12	0.051

- 1点接地ではシールド効果に変化無し
- 制御線に垂直方向2点接地ではシールド効果に変化無し
- 制御線に平行方向2点接地ではシールド効果が改善(相互インダクタンスが1/3になった)

クーロン・ブロッケイド (CB) 現象を利用する 単一電子デバイスの設計

- 解析的手法やモンテカルロ法を用いて、単一電子デバイス特性の設計や動作シミュレーションを行った。

$$k_B T < \frac{e^2}{2C}$$

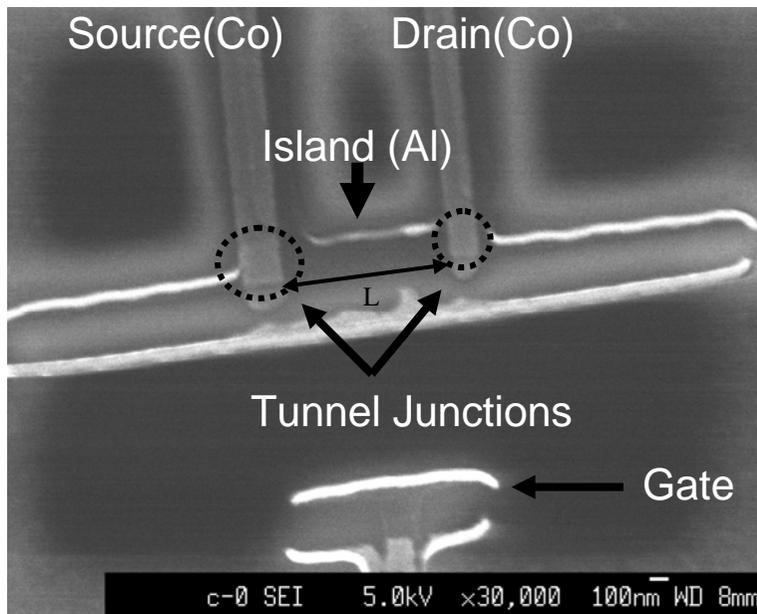


単一電子ターンスタイル素子用CB領域
表示ツールの開発とCB領域の設計

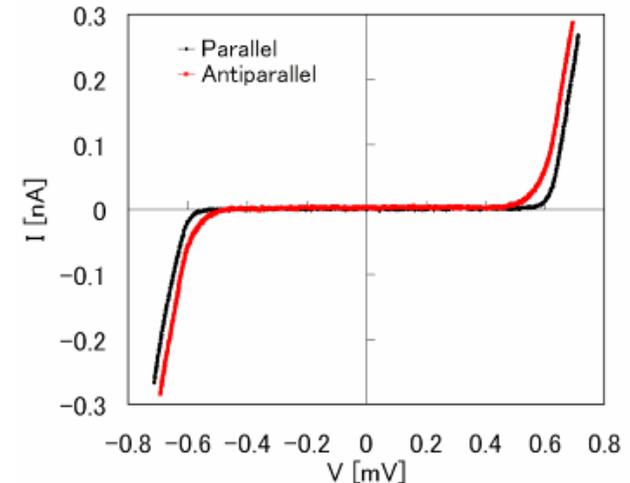
非対称単一電子トランジスタでの交流誘起
直流電流に関する数値計算

アルミ超伝導島電極を有するコバルト強磁性 単一電子トランジスタのspin依存伝導特性

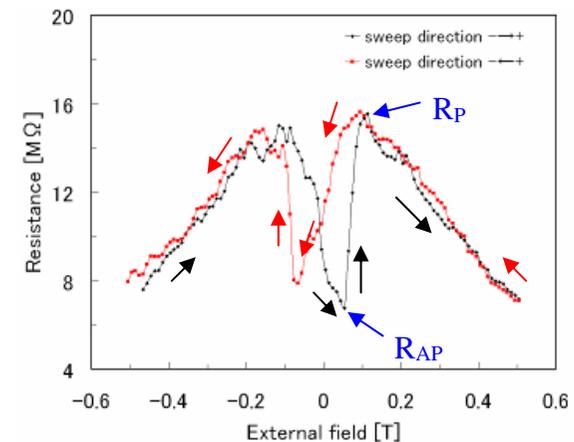
- 強磁性体(コバルト)と超伝導体(アルミ)を用いて、強磁性-超伝導-強磁性構造の単一電子トランジスタを作製した。アルミ島長さを $0.35 \sim 50 \mu\text{m}$ の素子を測定し、全ての長さでspin伝導特性が確認された。



作製した素子のSEM写真



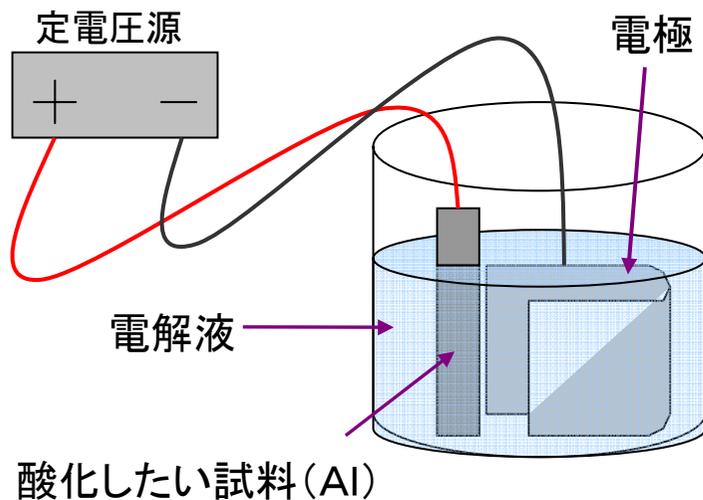
chip0609, $L=3.0 \mu\text{m}$ のI-V特性 (@ 160mK)



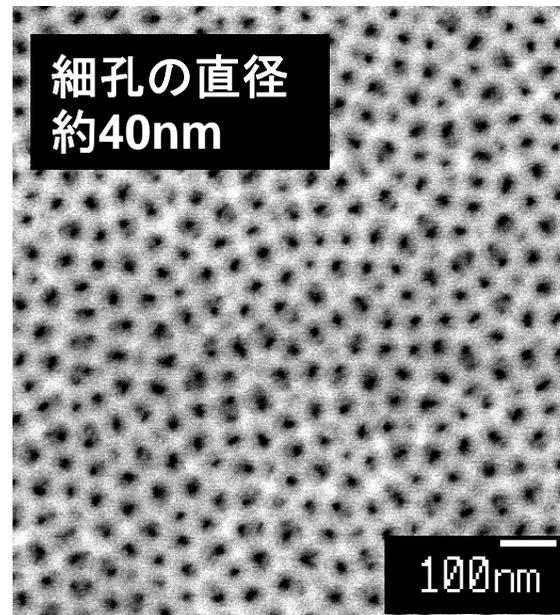
chip0609, $L=2.5 \mu\text{m}$ のTMR-H特性,
TMRR=55%

自己組織化プロセスを利用したナノ構造体作製

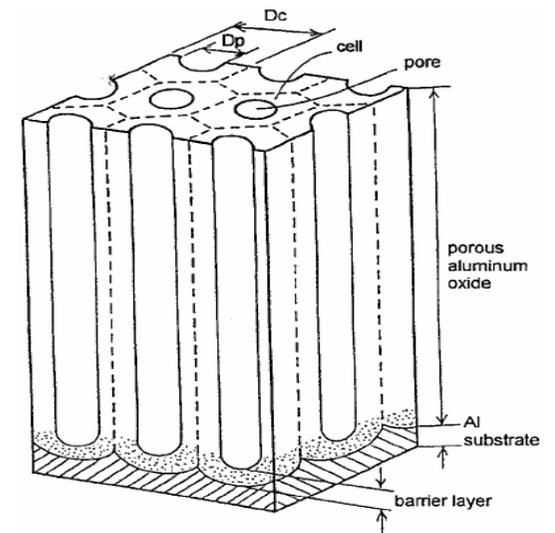
- アルミ酸化膜ナノホール(10~100nm径)の自己組織化配列を利用したデバイス作製
 - 界面(表面)形状の発展成長ダイナミクスの解析
 - 単電子デバイス作製プロセスへの応用
 - 電界放出素子作製への応用



作製方法

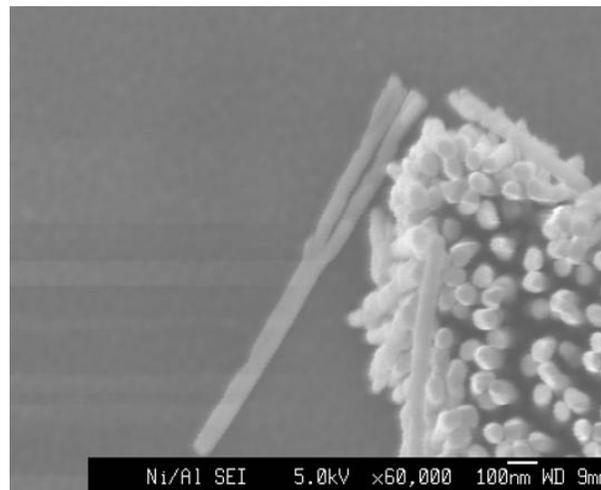
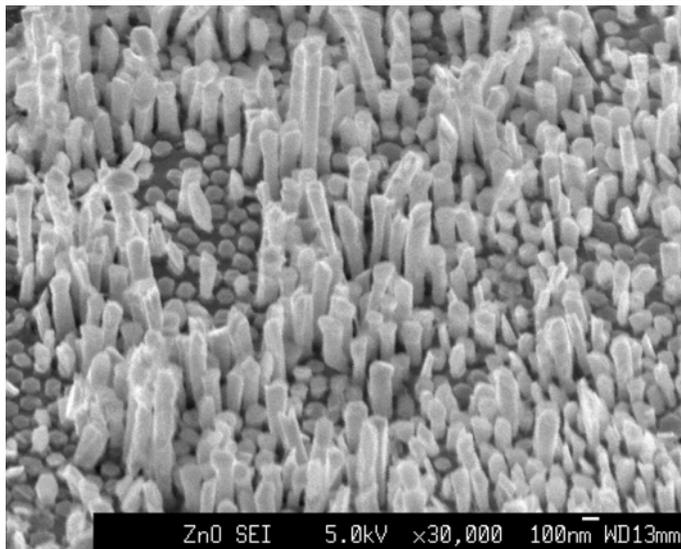
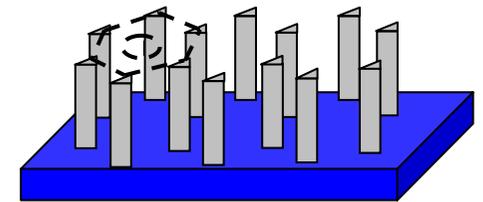
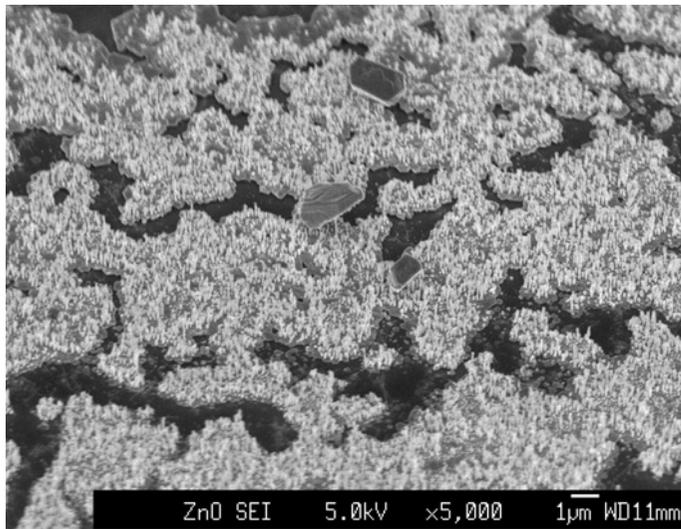


表面SEM像の例

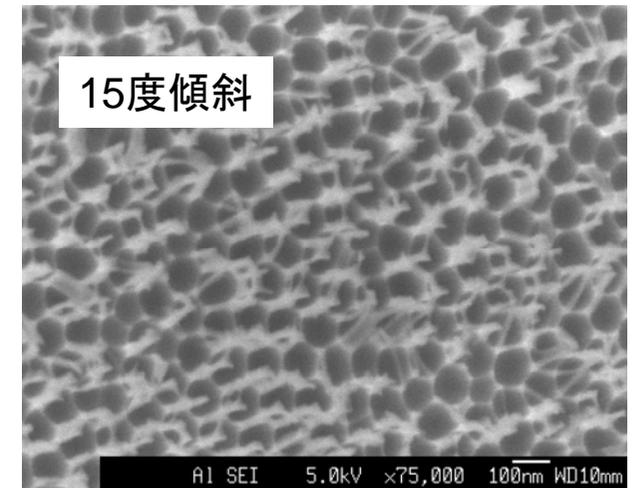


ナノホールの模式図

ナノホールへの機能性材料の埋め込みや 種々のナノ構造の実現



ニッケルのナノブランチ構造



アルミナのナノロッド配列

酸化亜鉛(ZnO)ナノロッド配列