

「超伝導単一光子検出器の物理メカニズムに関する大規模数値シミュレーション」
独立行政法人 情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 山下 太郎

1 研究の背景と目的

近年、超伝導単一光子検出器(Superconducting Single-Photon Detector; 以下 SSPD)は、高速応答・低ジッタ・高検出効率・低ダークカウント等の数多くの優位性により注目を集めている。既に、量子通信及び量子光学をはじめとする様々な分野で SSPD が利用され、従来の半導体を用いた検出器では不可能であった非常に高精度な実験結果が得られている。ところが、応用研究が盛んに進む一方で、SSPD の基礎的な物理メカニズムは未だ解明されていない部分が多い。SSPD では、超伝導のナノワイヤに光子が入射することにより、ゼロ抵抗状態にあるナノワイヤが抵抗状態に転移することで光子を検出するが、光子入射後にどのような物理過程を経て抵抗状態へと転移するのかは未解明である。そのため、今後の更なる高性能化に向けたデバイスの材料選定や設計に関する具体的な指針が存在しないのが現状である。

そこで本研究では、世界で初めて SSPD の光子検出メカニズムに関する 3 次元大規模数値シミュレーションを行うことで、SSPD の微視的な物理現象を解明し、デバイスの高性能化への知見を得ることを目的とし研究を行った。

2 研究方法・研究内容

実際の SSPD 素子は、超伝導体のナノワイヤがミアンダ状にパターンニングされた構造をもつが、数値シミュレーションの第一歩として今回は、その一部分を切り出した 1 本のナノワイヤを計算対象として仮定した。ナノワイヤを 3 次元的にメッシュ状に分割し、隣接するメッシュ間及びナノワイヤの表面に境界条件を設定する。その境界条件の下で、超伝導ナノワイヤの物理過程を記述する基礎方程式である(i) 時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式、(ii) 熱拡散方程式、そして(iii) Maxwell 方程式を連立させて数値的に解くことにより、光子を入射する前後の局所温度や超伝導オーダーパラメータ等の空間分布に関する時間変化をシミュレーションした。

本研究における数値シミュレーションは、本研究助成により購入した Dell 社製ワークステーション Precision T7600 を用いて行った。図 1 に、実機写真及び主な仕様を示す。3.10 GHz クロックの高速な Xenon 8 コア CPU と大容量 64 GByte メモリを搭載しており、今回のような大規模な数値シミュレーションを効率的に行なうことができた。例えば今回の光子入射シミュレーションでは、メッシュ数 48,000 (=200×40×6) 個のナノワイヤにおいて、1,000,000 ステップ(時間)の計算を、約 2 時間 40 分で行なうことが可能であった。



図 1: Dell 社製 Precision T7600 の実機写真。

- CPU: Intel Xeon 8 コア, 3.10 GHz,
- メモリ: 64 GByte (8 GByte×8),
- OS: Windows 7 Professional 64 bit,
- コンパイラ: Intel Visual Fortran Composer XE 2011, MPI ライブラリ 4.0 Windows 版。

計算の手順としては、まず外部からのエネルギー入射（単一光子の入射に対応）が無い状態で、任意のバイアス電流をナノワイヤに印加し、電圧の時間変化を計算する。十分な時間経過後の平衡状態における電圧の値が、印加したバイアス電流に対してナノワイヤに生じた電圧となる。この計算を様々なバイアス電流に対して行うことにより、電流-電圧 (IV) 特性が得られる。得られた IV 特性において、有限な電圧が発生しない最大の電流を、超伝導臨界電流とする。

次に、バイアス電流を臨界電流以下に設定し、平衡状態に到達後、光子の入射に対応する局所的なエネルギーの入力を行なう。今回のシミュレーションでは、任意の時間から一定時間だけ温度が上昇するシリンダー状の領域をナノワイヤ中に仮定することで光子の入射に対応させ、その前後におけるオーダーパラメータの空間・時間変化を調べた。

3 研究成果

(a) 入力パラメータ

最初に、今回のシミュレーションで用いた入力パラメータを表 1 に示す。これらのパラメータから、時間・電圧・電流密度の規格化因子として、 $t_0 = 2.5 \times 10^{-2}$ ps, $V_0 = 13.2$ mV, $J_d = 3.98 \times 10^{10}$ A/cm² が各々得られる。ナノワイヤとしては、長さ 500 nm (x), 幅 100 nm (y), 膜厚 4 nm (z) を仮定し、各次元に対してメッシュ数 6, 40, 200 個に分割した。

T_C [K]	T_w [K]	H_{C2} [kG]	ξ [nm]	κ	比熱 [J/(K cm ³)]	熱伝導率 [J/(K cm s)]
10.0	2.5	100.0	5.0	2.0	5.0×10^{-3}	3.6×10^{-2}

表 1: シミュレーションで用いた主な入力パラメータ。 $T_C, T_w, H_{C2}, \xi, \kappa$ は各々、超伝導臨界温度、熱浴温度、第 2 臨界磁場、コヒーレンス長、GL パラメータを表す。

(b) IV 特性

図 2 に、本シミュレーションにより得られた IV 特性を示す。平衡状態に至るまでの時間として 500,000 – 2,000,000 ステップ (= 500 t_0 – 2000 t_0) 計算を行い、各バイアス電流密度に対する電圧値を決定した。図に示されているように、0.1550 J_d 近傍で電圧状態へ転移しており、臨界電流密度 $J_c = 0.1550 J_d$ が得られた。

(c) 光子応答特性

次に、臨界電流以下にバイアスしたナノワイヤに生じる電圧の時間変化を調べる。図 3(a)に、バイアス電流を 0.95 J_c に固定し、エネルギーを入射しない場合と、 $t = 400t_0 - 415t_0$ の間に 1.66 keV 及び 3.32 keV のエネルギーをナノワイヤ中央部に入射した場合の電圧変化を示す。前述のよ

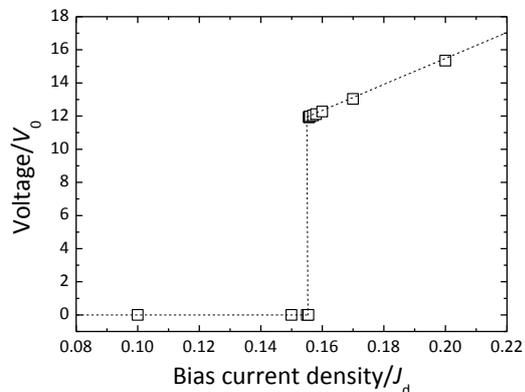


図 2: ナノワイヤの IV 特性。

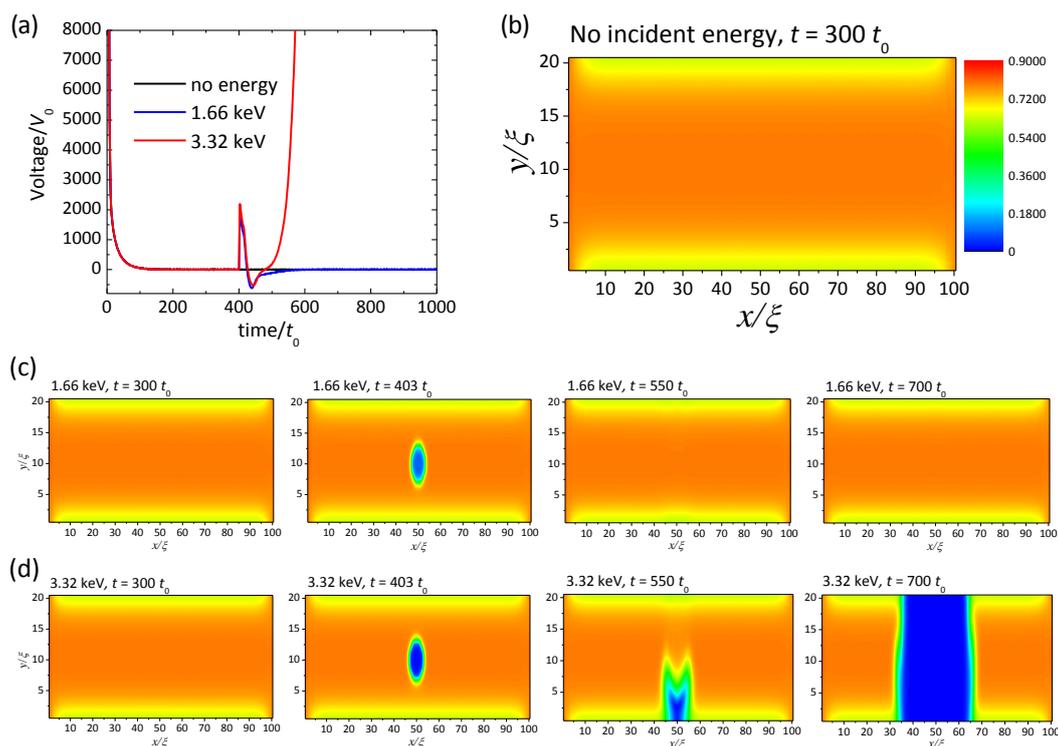


図 3: (a) ナノワイヤに生じる電圧の時間変化。エネルギーを入射しない場合（黒線）と、 $t = 400t_0 - 415t_0$ の間に 1.66 keV（青線）及び 3.32 keV（赤線）のエネルギーを入射した場合を示す。(b) エネルギー入射がない場合のオーダーパラメータの xy 空間分布。(c) 1.66 keV 及び(d) 3.32 keV のエネルギーを入射した場合、各時間におけるオーダーパラメータの xy 空間分布。

うにエネルギー入射がない場合には、バイアス電流が臨界電流以下のため、平衡状態に入ってしまえば電圧は発生しない。一方、1.66 keV のエネルギーがナノワイヤに入射した場合（図 3(a)青線）、超伝導性が一時的に抑制され、有限な電圧パルスが発生する。その後は自発的に超伝導性が回復し、再びゼロ電圧状態へと落ち着く。次に、より大きな 3.32 keV のエネルギーが入射した場合（図 3(a)赤線）には、電圧パルスが発生した後にゼロ電圧状態へと回復せず、電圧が増大する。

これらの場合に対して、ナノワイヤ中のオーダーパラメータの空間分布がどう変化しているかを調べる。図 3(b)に、エネルギー入射がない場合のオーダーパラメータの xy 空間分布を示す。この図から、平衡状態ではオーダーパラメータがナノワイヤ全体に一樣分布していることが分かる。次に 1.66 keV のエネルギーを入射した場合の各時間毎のオーダーパラメータの空間分布を図 3(c)に示す。この図から、エネルギーを入射した直後 ($t = 403t_0$) には、入射部分のオーダーパラメータが強く抑制されていることが分かる。これにより一時的に有限な電圧がナノワイヤに発生するが、その後再びオーダーパラメータは回復し、エネルギー入射前と同様な一樣分布の状態で安定する。一方、3.32 keV のエネルギー入射の場合（図 3(d)）には、エネルギー入射をきっかけとして、次第にオーダーパラメータの抑制された領域が広がり ($t = 550t_0$)、ついにはナノワイヤを横断してオーダーパラメータがゼロとなる ($t = 700t_0$)。その後、この常伝導領域がさらにナノワイヤ全体に拡大するため、電圧が増大することになる。この状況は、SSPD の光子検

出過程に対応していると考えられ、実際のデバイス動作では、ナノワイヤに十分大きな抵抗が発生した時点で、入力インピーダンス 50Ω の読み出し側へバイアス電流が流れるために、ナノワイヤの超伝導性は自発的に回復し次の光子を検出できる状態へと戻ることになる。

現状では、電圧状態へと遷移するために必要なエネルギーが keV オーダーと非常に大きく、実際の単一光子のエネルギー (eV オーダー) と比較すると乖離があるが、今後熱浴とのカップリングをはじめとする環境パラメータを調整することにより、より直接的な実験との比較が可能となることが期待される。

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究において SSPD の基本的な光子検出過程が再現されたことにより、今後シミュレーションの更なる改良や実験データとの詳細な比較を通じて、高性能な SSPD 開発に向けた材料選択やデバイス設計の指針が得られることが期待される。これらの得られた開発指針によってより高性能な SSPD が開発されれば、量子情報通信や光通信、さらにはライダー (LIDAR; Laser Imaging Detection and Ranging) やバイオサイエンスなど、単一光子を用いた幅広い研究開発全般へと大きな波及効果をもたらすことは必至である。

5 謝辞

本研究を遂行するにあたり、独立行政法人日本原子力研究開発機構の太田幸宏博士と町田昌彦博士、東北大学金属材料研究所の小山富男博士には有益な御議論及び多大な御協力を頂きました。ここに感謝致します。