

Efek Tipe NbRe Terhadap Sensitivitas *Superconducting Single Photon Detector* (SSPD) Dalam Penginderaan dan Komunikasi Kuantum

Aura Monalisa Rahman^{1*}, Sovian Aritonang¹

¹⁾ Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Kawasan IPSC, Bogor, 16810, Indonesia

*Email: auramonalisa1@gmail.com

ABSTRACT

The Single Photon Detector is employed in quantum computing, sensing, and communication technologies. NbRe, a superconductor, exhibits lower noise, energy gap, and minimum energy compared to silicon, resulting in higher sensitivity. NbRe can be found in the form of microstrips and nanostrips. Based on the data, NbRe with a microstrip cross-sectional area will have higher sensitivity and efficiency than NbRe with a nanostrip cross-sectional area. This is because the critical temperature (T_c), minimum energy (E_{min}), and thickness of NbRe microstrip are smaller than those of nanostrip, while its critical current density is larger. Based on literature review and calculations, it is determined that NbRe microstrip has $T_c = 3.08 - 5.23K$, $J_c = 15.5 \times 10^9 A/m^2$, $E_{min} = 0.017 eV$, and a thickness of only 4 nm. In contrast, NbRe nanostrip has $T_c = 6.77 K$, $J_c = 5 \times 10^9 A/m^2$, $E_{min} = 0.28 eV$, and a thickness of approximately 14.4 nm.

Keyword: Superconducting Single Photon Detector, NbRe, Sensitivity, Quantum Sensing, Quantum Communication

PENDAHULUAN

Single Photon Detector (SPD) menjadi kunci penting dalam teknologi komputasi, penginderaan dan komunikasi kuantum. Detektor ini dapat ditemukan dalam teknologi seperti *Light Detection and Ranging* (LIDAR), *Spectroscopy*, *DNA Sequencing*, *Optical Time Domain Reflectometry*, *Picosecond Imaging Circuit Analysis* (PICA) dan lain-lain. Detektor yang ideal membutuhkan efisiensi yang besar, kemampuan *Photon – Number – Resolving* (PNR), akurasi pengukuran waktu yang tinggi, dan tidak adanya saturasi serta deteksi sinyal palsu (*dark count*) dalam proses deteksi. Material seperti *photomultiplier*, semikonduktor dan superkonduktor adalah jenis – jenis material yang dibutuhkan untuk dapat menciptakan *Single Photon Detector* [1].

Pemilihan material untuk SSPD saat ini masih menggunakan NbN, superkonduktor tipe II yang memiliki suhu kritis sekitar 16 K dan panjang koheren (ξ) nya sebesar 3-4 nm. Selain itu, NbN memiliki sifat tinggi J_c dan respon elektronik yang sangat cepat. Meskipun begitu, NbN memiliki celah amplitudo yang jauh dan hanya efisien mendeteksi single photon berfrekuensi di 260nm. Sedangkan di dalam komunikasi kuantum dari jarak jauh, membutuhkan deteksi panjang gelombang yang lebih panjang lagi. Untuk mendeteksi rentang yang lebih besar, dapat dilakukan dengan mereduksi dimensi kabel atau memilih material superkonduktor dengan nilai energi gap, rapat keadaan, dan difusi elektronik yang lebih kecil [2].

NbRe merupakan material jenis Superkonduktor yang dapat digunakan untuk membuat Single Photon Detector. Kelebihan utama material ini jika dibandingkan dengan bahan silikon adalah bekerja di suhu kriogenik yang dapat mengurangi noise, menurunkan nilai celah energi superkonduktor dan memperkecil energi foton minimum (E_{min}) yang dapat di deteksi. Dengan kata lain, material NbRe memiliki sensitivitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan bahan silikon. Selain itu, SSPD NbRe mampu mendeteksi panjang gelombang hingga spektrum infra-merah. Tingkat sensitivitas dari detektor inilah yang menjadi kunci efisiensi dalam mendeteksi single photon [2].

Dalam aplikasinya, material NbRe dapat ditemukan dalam bentuk mikrostrips, dan *nanostrips*. NbRe mikrostrips dan *nanostrips* adalah selembar NbRe yang memiliki ukuran mikrometer dan nanometer. Bentuk ini seringkali digunakan untuk pengujian dasar bahan superkonduktor. Tujuan

penelitian ini dilakukan adalah menemukan pengaruh tipe NbRe terhadap sensitivitas *Superconducting Single Photon Detector* (SSPD). Ada atau tidaknya pengaruh bentuk aplikasi NbRe terhadap sensitivitas SSPD dapat menjadi pertimbangan tersendiri untuk memilih bentuk NbRe yang sesuai dengan teknologi penginderaan dan komunikasi kuantum.

Superconducting Single Photon Detector

Single photon detector adalah perangkat yang memproduksi output pulsa listrik sebagai respon terhadap input yang berupa foton tunggal. Beberapa metode pengukuran sinyal pada *level single photon* melibatkan pencampuran medan single photon dengan medan optik yang kuat dan menggunakan detektor optik konvensional. Metode ini antara lain meliputi tomografi homodyne, deteksi heterodyne, dan interferometri spectral [3]. Superconducting Single photon detector merupakan salah satu jenis detektor foton tunggal yang memiliki sensitivitas tinggi. SSPD mampu memenuhi syarat tingkat deteksi sinyal palsu (dark count) rendah, efisiensi deteksi yang tinggi, waktu respon yang cepat dan waktu jitter yang rendah. Namun, Single photon jenis ini memiliki Batasan dalam mendeteksi jangkauan spektrum gelombang. Untuk meningkatkan kemampuan dari SSPD, dibutuhkan optimalisasi material yang dipilih, desain alat deteksi serta pencarian baru terhadap superkonduktor yang dapat digunakan sebagai bahan SSPD [4].

NbRe

NbRe merupakan non-centrosymmetric superkonduktor yang memiliki ketidaksimetrian inversi yang berpengaruh pada pembentukan pasangan elektron dalam materi tersebut. Ketidaksimetrian inversi NbRe menyebabkan sifat pasangan electron-elektro dalam materi tersebut sangat kompleks. Pasangan ini dapat menjadi tiga komponen spin (spin-triplet) atau memiliki satu komponene spin (spin-singlet) dan inilah yang mempengaruhi bagaimana pasangan-pasangan electron tersebut berinteraksi dalam material NbRe [5].

Niobium adalah unsur kimia yang terletak di tabel periodik pada nomor atom 41 dengan simbol Nb. Niobium adalah logam transisi yang ditemukan dalam kelompok 5 (VB). Materi ini memiliki kemampuan superkonduktif pada suhu rendah, sehingga sering digunakan dalam aplikasi seperti pembuatan kawat superkonduktor dan pembuatan magnet kuat. Selain itu, niobium juga digunakan dalam beberapa peralatan yang mampu mengatasi masalah korosi, seperti tangki kimia dan pipa. Unsur niobium berasal dari bijih piroklor yang sering ditemukan bersama dengan unsur tantalum [6][7].

Rhenium adalah unsur kimia yang memiliki nomor atom 75 dan disimbolkan sebagai Re. Dikenal dengan titik leleh yang sangat tinggi, unsur ini sering digunakan dalam produksi filamen untuk berbagai keperluan, termasuk lampu pijar dan peralatan pemanas pada suhu ekstrem. Rhenium juga digunakan dalam pembuatan paduan yang mampu melawan korosi serta dalam produksi katalis yang esensial untuk industri kimia. Menariknya, rhenium juga termasuk dalam kelompok unsur yang menunjukkan sifat superkonduktor ketika suhu sangat rendah [8].

Sensitivitas

Sensitivitas detektor ditentukan oleh rasio antara tingkat sinyal dan tingkat noise yang terdeteksi, yang disebut sebagai rasio sinyal-ke-noise (SNR). Terdapat juga parameter terkait yang disebut noise equivalent power (NEP), yang menggambarkan daya cahaya yang diperlukan untuk menghasilkan sinyal yang setara dengan tingkat noise (SNR = 1) dalam suatu bandwidth listrik tertentu,

$\Delta v = 1/(2\tau_{int})$, yang setara dengan 1 Hertz (sekitar 1/2 detik waktu integrasi, τ_{int}) yang dapat ditemukan dengan formula:

$$NEP = \frac{P}{\sqrt{\Delta v}} \quad (1)[9]$$

Dalam studi ini, perbandingan sensitivitas superconducting single photon detector dapat ditentukan dengan membandingkan, Kerapatan arus kritis (J_c) dan faktor yang mempengaruhi

energi minimum seperti ketebalan (d) dan suhu kritis (T_c). Hal ini karena s kerapatan arus kritis dan energi minimum akan menentukan efisiensi serta sensitivitas dari sebuah *superconducting single photon detector* [2].

Penginderaan Kuantum

Pengindraan kuantum, atau dalam bahasa Inggris dikenal sebagai "*quantum sensing*," adalah konsep di mana sifat – sifat mekanika kuantum digunakan untuk meningkatkan atau memberikan sensitivitas yang lebih tinggi dalam pengukuran atau deteksi suatu fenomena atau parameter fisik. Ini memanfaatkan prinsip-prinsip dasar mekanika kuantum seperti superposisi, interferensi, entanglement, dan pengukuran presisi.

Beberapa contoh pengindraan kuantum meliputi:

Magnetometri Kuantum: Menggunakan sifat spin elektron atau nuklir dalam mekanika kuantum untuk mengukur medan magnet dengan sensitivitas tinggi.

Gravitasi Kuantum: Memanfaatkan interferensi atom atau partikel kuantum untuk mendeteksi variasi kekuatan gravitasi.

Pengukuran Suhu Kuantum: Memanfaatkan sifat perubahan energi dan tingkat kuantum untuk mengukur suhu dengan presisi tinggi.

Lidar Kuantum: Menerapkan prinsip kuantum untuk sistem pengindraan jarak jauh, seperti dalam pemantauan atmosfer atau pengukuran jarak jauh.

Spektroskopi Kuantum: Menggunakan spektroskopi mekanika kuantum untuk mendeteksi, mengidentifikasi, dan menganalisis molekul dan partikel secara tepat [1].

Komunikasi Kuantum

Komunikasi kuantum adalah salah satu aspek penting dalam bidang ilmu fisika kuantum yang berkaitan dengan pengiriman dan penerimaan informasi secara aman menggunakan prinsip-prinsip mekanika kuantum. Ini berbeda dari komunikasi klasik yang mengandalkan transmisi sinyal listrik atau elektromagnetik. Komunikasi kuantum menggunakan sifat – sifat unik partikel kuantum, seperti superposisi dan entanglement, untuk mengamankan pertukaran informasi dan mencegah peretasan.

Keamanan Maksimal: Komunikasi kuantum dapat memberikan keamanan maksimal dalam pertukaran informasi. Ini karena observasi partikel kuantum akan mengganggu keadaannya, sehingga jika ada peretasan atau penyadapan, akan terdeteksi.

Enkripsi Kuantum: Teknologi komunikasi kuantum digunakan untuk mengamankan enkripsi data. *Quantum key distribution* (QKD) adalah salah satu aplikasi kunci dari komunikasi kuantum di mana dua pihak dapat berbagi kunci enkripsi yang aman.

Jarak Terbatas: Meskipun komunikasi kuantum sangat aman, jarak transmisi saat ini terbatas dan sering memerlukan saluran serat optik atau jalur khusus. **Pengembangan Teknologi:** Komunikasi kuantum terus mengalami perkembangan teknologi untuk memperluas jarak dan meningkatkan efisiensi pertukaran informasi kuantum [10], [11].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian *systematic literature review* merupakan metode yang digunakan dalam penelitian ini. Metode ini merupakan metode mengumpulkan literatur untuk diidentifikasi, analisis serta evaluasi guna memecahkan suatu permasalahan. SLR sering kali membutuhkan penentuan agenda riset, sebagai bagian dari thesis dan riset [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Microstrip NbRe diidentifikasi dengan mendeposisikan NbRe pada substrat Si/SiO_x dengan menggunakan teknik DC *magnetron sputtering* dalam kondisi vakum ultra – tinggi (tekanan sekitar 10⁻⁸ mbar) pada suhu ruangan. Proses deposisi dilakukan dalam lingkungan beratmosfer argon sekitar 4 × 10⁻³ mbar dengan *growth rate* film sekitar 0.3 nm/s. Permukaan NbRe kemudian dilindungi dengan lapisan penutup Al setebal 2 nm. Sampel – sampel ini kemudian dibentuk pola melalui litografi optik dengan bantuan pencetakan cerdas (*smart printing*). Selanjutnya, pola

tersebut ditransfer ke lapisan superkonduktor dengan menggunakan proses argon ion etching, dengan dig rate sekitar 1 nm per menit. Dalam penelitian ini digunakan 4 jenis sampel diantaranya sampel A1, B1, A2 dan B2 yang dapat dilihat spesifikasinya pada tabel berikut [13].

Tabel 1. Karakteristik dari sampel A1 dan B1 [13].

Device	Geometry	d (nm)	w (μm)	L (μm)	ρ_b ($\mu\Omega\text{ cm}$)	a (k Ω)	b	T_c (K)	T_{BKT} (K)	$\lambda_L(0)$ (nm)	$\xi(0)$ (nm)
A1	Single strip	4	2.5	12.5	150 ± 10	1.9 ± 0.4	9 ± 6	5.14 ± 0.06	4.92 ± 0.08	570 ± 20	5.7 ± 0.2
B1	Single strip	4	6.7	7.5	110 ± 10	0.54 ± 0.09	6 ± 4	5.2 ± 0.1	4.8 ± 0.3	480 ± 30	5.7 ± 0.2

Tabel 2. Karakteristik Sampel A2 dan B2 saat diuji di suhu 1.79 dan 1.57 K [13].

Device	Geometry	d (nm)	w (μm)	L (μm)	$A = wL$ (μm^2)	$J_c(T)$ (MA cm^{-2})
A2	Single strip	4	1.3	5	6.5	1.55
B2	Pair of parallel strips	4	1.4	5	14.0	2.79

Dari pengujian diatas, didapatkan karakter alat serta parameter *microcopsis* dari NbRe yang dibandingkan dengan material *Superconductor Single Photon Detector* lainnya.

Tabel 3. Perbandingan karakter alat dan parameter mikroskopis yang didapatkan dari analisis DCR untuk superkonduktor yang berbeda [13].

Material	w (μm)	d (nm)	$\frac{T}{T_c}$	$\frac{U_{VAP}}{k_B}$ (K) @ $I_b = 0.99I_c$	$\frac{U_{VS}}{k_B}$ (K) @ $I_b = 0.99I_c$	$E_0 \xi c^2 d$ (meV)	γ
NbRe ^a	1.3	4	0.35	96	207	10.07	93
MoSi ^b	1.6	5	0.43	90	180	5.27	83
WSi ^c	1	2.1	0.28	24	48	2.08	89
NbN ^d	2.12	5.8	0.49	173	269	8.85	10

Dari tabel diatas, didapatkan data penting berupa suhu kritis (T_c) untuk sampel A2 dan B2 Suhu A2:

$$\frac{T}{T_c} = 0.35$$

$$T_c \frac{1.79}{0.35} = K = 3.08K$$

Suhu B2:

$$\frac{T}{T_c} = 0.3$$

$$T_c \frac{1.57}{0.3} = K = 5.23K$$

- Kerapatan arus (J_c) kritis
 $J_c = 1.55 \text{ MA/cm}^2$
 $J_c = 15.5 \times 10^9 \text{ A/m}^2$

Energi minimum (E_{\min}) material NbRe *microstrip* dengan ketebalan 4 nm

$$E_{\min} = 10.7 \text{ meV}$$

$$E_{\min} = 0.017 \text{ eV}$$

Sedangkan untuk mengidentifikasi *nanostrip*, Film Nb 0.18 Re 0.82 dan bilayer Nb0.18Re0.82/Cu0.45Ni0.55 (selanjutnya disebut sebagai NbRe dan NbRe/CuNi) dideposisikan melalui metode dc magnetron sputtering pada substrat Si (100) dalam sistem ultra-high vacuum (UHV) pada suhu kamar. Tekanan dasar sistem adalah $P = 4.4 \times 10^{-8}$ mbar, dan tekanan argon (Ar) selama proses deposisi adalah $P_{NbReAr} = x \times 10^{-3}$ mbar dan $P_{CuNiAr} = 8 \times 10^{-3}$ mbar. Ketebalan film NbRe adalah $d_{NbRe} = 15$ nm, dan pada bilayer, ketebalan NbRe = $d_{CuNi} = 15$ nm. Sampel-sampel tersebut difabrikasi melalui litografi UV konvensional menjadi jembatan dengan lebar $w = 10 \mu\text{m}$ dan panjang (antara kontak tegangan) $L = 100 \mu\text{m}$ [2]. Dari metode tersebut dihasilkan beberapa parameter NbRe yang dibandingkan dengan material NbN dan

Tabel 4. Parameter *microscopic* jembatan NbRe dan untuk NbN dengan ketebalan 14.4nm

	NbRe	NbN
ρ_n ($\mu\Omega \times \text{cm}$)	143	117
D ($10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)	0.56	0.60
T_c (K)	6.77	15.25
$\Delta(0)$ (meV)	1.03	2.73
N_0 ($10^{47} \text{ J}^{-1} \text{ m}^{-3}$)	4.8	5.6
$J_{cp}(0)$ (10^{11} A/m^2)	2.3	9.3
$\lambda(0)$ (nm)	483	291

Dari tabel diatas, didapatkan data penting berupa :

- Suhu kritis (T_c) untuk NbRe nanotrip
- Suhu kritis (T_c) untuk NbRe *nanostrip* menurut data adalah sebesar 6.77 K
- Kerapatan arus kritis J_c
- Kerapatan arus kritis J_c untuk NbRe *nanostrip* menurut data adalah sebesar $5 \times 10^9 \text{ A/m}^2$
- Energi minimum (E_{\min}) material NbRe *nanostrip*
- Energi minimum (E_{\min}) NbRe *nanostrip* dengan ketebalan 14.4 nm adalah 0.28 eV

Dapat dilihat bahwa lembaran NbRe yang memiliki ukuran mikrostrips akan memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dibanding *nanostrip*. Hal ini dikarenakan besarnya nilai energi minimum mikrostrip lebih kecil dibandingkan dengan *nanostrip*, suhu kritis mikrostripanyang lebih kecil dan rapat arus *microstrip* yang justru lebih besar dibandingkan dengan desain *nanostrip*. Berdasarkan data, ketebalan suatu strip akan sangat berpengaruh terhadap energi minimum yang dibutuhkan. Ketebalan strip *microstrip* dalam uji coba hanya sekitar 4nm sedangkan ketebalan *nanostrip* sekitar 15nm. Maka dari itu, semakin tipis suatu lembaran NbRe maka akan semakin kecil pula E_{\min} yang dibutuhkan.

Selain ketebalan strip, Suhu kritis juga merupakan parameter yang mempengaruhi besarnya E_{\min} dari NbRe. Berdasarkan data didapatkan bahwa suhu kritis *microstrip* membutuhkan suhu di rentang 3.08 – 5.23K sedangkan suhu kritis NbRe *nanostrip* hanya membutuhkan suhu kritis 6.77K. Apabila dilihat dari suhu nya, maka akan lebih menguntungkan apabila kita mampu mendapatkan suhu yang lebih besar karena akan mempermudah pembuatan pendingin untuk menciptakan suhu kriogenik tersebut. Namun, tentunya hal tersebut akan diikuti oleh kenaikan Energi minimum (E_{\min}).

Luas penampang lembaran juga mempengaruhi rapat arus kritis sehingga *microstrip* akan memiliki rapat arus kritis (J_c) yang lebih besar. J_c yang lebih besar, akan meningkatkan sensitivitas serta efisiensi dari suatu detektor *superconducting single photon*. Rapat arus kritis yang dimiliki oleh NbRe *microstrip* 3 kali lebih besar dibandingkan dengan rapat arus kritis (J_c) *nanostrip*. Maka dari itu, semakin luas penampang dari lembaran, maka akan semakin besar pula sensitivitasnya.

KESIMPULAN

Sensitivitas *superconducting single photon detector* NbRe akan sangat dipengaruhi oleh energi minimum E_{\min} , ketebalan strip, rapat arus kritis (J_c) dan suhu kritis dari desain ukuran lembaran NbRe. Semakin besar rapat arus kritis nya, maka sensitivitas dan efisiensi akan meningkat. Sebaliknya, semakin kecil E_{\min} , ketebalan strip dan suhu kritis, maka sensitivitas dan efisiensi dari strip NbRe akan meningkat. Namun, semakin kecil suhu kritisnya, maka akan semakin sulit untuk menciptakan pendingin pada suhu kriogenik tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Bienfang, J. Fan, A. Migdall, and S. V Polyakov, "Single-Photon Sources and Detectors Book: Chapter 1: Introduction," 2014.
- [2] M. Caputo, C. Cirillo, and C. Attanasio, "NbRe as candidate material for fast single photon detection," *Appl Phys Lett*, vol. 111, no. 19, Nov. 2017, doi: 10.1063/1.4997675.
- [3] M. J. Stevens, "Photon Statistics, Measurements, and Measurements Tools," 2013, pp. 25–68. doi: 10.1016/B978-0-12-387695-9.00002-0.
- [4] C. Cirillo *et al.*, "Superconducting nanowire single photon detectors based on disordered NbRe films," *Appl Phys Lett*, vol. 117, no. 17, Oct. 2020, doi: 10.1063/5.0021487.
- [5] C. Cirillo, M. Caputo, G. Divitini, J. W. A. Robinson, and C. Attanasio, "Polycrystalline NbRe superconducting films deposited by direct current magnetron sputtering," *Thin Solid Films*, vol. 758, p. 139450, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.tsf.2022.139450.
- [6] N. S. Nzeh, A. P. I. Popoola, A. A. Adeleke, and S. O. Adeosun, "Factors and challenges in the recovery of niobium and tantalum from mineral deposits, recommendations for future development – A review," *Mater Today Proc*, vol. 65, pp. 2184–2191, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.034.
- [7] "niobium -- Britannica Online Encyclopedia".
- [8] "Britannica, rhenium. Encyclopedia Britannica, 9 Jun. 2022,".
- [9] J. A. Lau, V. B. Verma, D. Schwarzer, and A. M. Wodtke, "Superconducting single-photon detectors in the mid-infrared for physical chemistry and spectroscopy," *Chem Soc Rev*, vol. 52, no. 3, pp. 921–941, 2023, doi: 10.1039/D1CS00434D.
- [10] A. Trifonov and A. Zavriyev, "Secure communication with a heralded single-photon source," *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, vol. 7, no. 12, pp. S772–S777, Dec. 2005, doi: 10.1088/1464-4266/7/12/050.
- [11] F. Zhou *et al.*, "Twin-field quantum key distribution with heralded single photon source," *The European Physical Journal D*, vol. 74, no. 9, p. 185, Sep. 2020, doi: 10.1140/epjd/e2020-10219-0.
- [12] A. Crisnaldy, "LITERATURE REVIEW METODOLOGI PENELITIAN," May 2021.
- [13] P. Ercolano *et al.*, "Investigation of dark count rate in NbRe *microstrips* for single photon detection," *Supercond Sci Technol*, vol. 36, no. 10, p. 105011, Oct. 2023, doi: 10.1088/1361-6668/acf24a.