

УДК 62-982**ВЫБОР ЭЛЕКТРОННОГО РЕЗИСТА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА**

Владимир Александрович Желтиков

*Магистр 1 года,**кафедра «Электронные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана**Научный руководитель: К.М. Моисеев**кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

Однофотонные детекторы (superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD) появились в 2001 году и сейчас находят широкое применение [1] в следующих областях: квантовая криптография, квантовая оптическая когерентная томография, создание квантовых оптических интегральных схем, неразрушающее тестирование микросхем и ЛИДАР-системы, астрономические исследования.

Чувствительный элемент детектора представляет собой меандр из ультратонкой пленки (5 нм) сверхпроводящего материала. Основной характеристикой устройства является квантовая эффективность (КЭ), которая определяется прежде всего шириной полоски. Наилучший результат 92% достигнут при размере 100 нм, так как такой ширины достаточно для образования горячего пятна и импульса напряжения [2]. Ширины менее 100 нм также будет достаточно для детектирования, однако изготовление таких нанополосок технологически более сложно. Для получения линий такой ширины используют электронно-лучевую литографию. Резист, используемый в качестве маски, должен обеспечивать разрешение не хуже 100 нм.

На величину КЭ также оказывает влияние шероховатость края линии нанополоски (line edge roughness, LER) – чем выше LER, тем хуже КЭ [3, 4]. Формирование меандра SNSPD происходит при травлении через маску резиста. Шероховатость края нанополоски будет иметь то же или большее значение, что у маски резиста. По этой причине необходимо достичь минимальной шероховатости края резиста.

Выбор резиста для изготовления маски методом электронно-лучевой литографии производился по критериям использования ведущими научными группами с 2015 года и стоимости. Результаты литературного обзора за последние 6 лет представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Использование резистов ведущими научными группами

Научная группа	Резист				
	ZEP-520A	PMMA	HSQ	AR-P6200	ma-N2401
МПУ (Россия)	[5]	[6]	[7]	-	[8]
MIT (США)	[9]	[10]	[11]	-	[12]
KIT (Германия)	[13]	[13]	[7]	-	-
NIST (США)	[14]	[15]	-	-	-
Delft (Нидерланды)	-	[16]	[17]	[16]	[18]
RISE (Китай)	-	[19]	-	[20]	-

Можно сделать вывод, что наиболее часто используемыми являются резисты ZEP-520A (480 тыс. руб), PMMA (80 тыс. руб) и HSQ (340 тыс. руб). По результатам критериального анализа выбран резист PMMA, используемый всеми ведущими научными группами и имеющий минимальную стоимость.

Данный резист может быть как позитивным, так и негативным, в зависимости от дозы экспонирования [10]. В случае использования малых доз (стандартные рекомендации производителя) резист является позитивным, при в 100 раз больших дозах резист становится негативным.

В работе [21] авторы изготовили полоску шириной 100 нм при помощи позитивного и негативного РММА. Измерение характеристик сверхпроводящей полоски показало, что при использовании негативного резиста нанопроволока имеет большую критическую температуру и плотность тока. Авторы связывают это с качеством края, так как при использовании позитивного РММА LER выше.

Авторы [10] провели аналогичный эксперимент, изготовив меандры площадью 4x4 мкм с линиями шириной 100 нм. При измерении характеристик однофотонного детектора выявлено, что меандр, изготовленный с использованием негативного РММА, имеет большую критическую плотность тока и скорость счета, так как LER меньше, чем при использовании маски позитивного резиста.

Для создания SNSPD выбран негативный РММА, который используется всеми ведущими научными группами, позволяет получить размер 100 нм и имеет наименьшую стоимость. Использование негативного РММА позволяет увеличить критическую температуру и скорость счета устройства.

Литература

1. Irwin K. D., Hilton G. C. //Cryogenic particle detection. – 2005. – С. 63-150.
2. Kovalyuk V. et al. //J. of Phys.: Conf. Ser. – IOP Publishing, 2017. – Т. 917. – №. 6. – С. 062032.
3. Kerman A. J. et al. //App. Phys. Lett. – 2007. – Т. 90. – №. 10. – С. 101110.
4. Jahani S. et al. //J. of Appl. Phys. – 2020. – Т. 127. – №. 14. – С. 143101.
5. Korneeva Y. et al. //IEEE Trans.on Appl. Supercond. – 2016. – Т. 26. – №. 3. – С. 1-4.
6. Корнеева Ю.П. Дис. ... канд. физ. мат. наук. МПГУ. 2014.
7. Kahl O. et al. //Optica. – 2017. – Т. 4. – №. 5. – С. 557-562.
8. Polyakova M. I. et al. //J.l of Phys.: Conf. Ser. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1410. – №. 1. – С. 012166.
9. Martinez G. D. et al. //arXiv preprint arXiv:2003.02898. – 2020.
10. Charaev I. et al. //IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2019. – Т. 29. – №. 5. – С. 1-5.
11. Zhu D. et al. //CLEO: QELS_Fundamental Sci. – Opt. Society of America, 2016. – С. FTu4C.
12. Toomey E. et al. //J. of Vac. Sci. & Tech. B, Nanotech. and Microel.: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2019. – Т. 37. – №. 5. – С. 051207.
13. Baghdadi R. et al. //Supercon. Sci. and Tech. – 2021. – Т. 34. – №. 3. – С. 035010.
14. Chiles J. et al. //arXiv preprint arXiv:2110.01582. – 2021.
15. Wollman E. E. et al. //Opt. express. – 2019. – Т. 27. – №. 24. – С. 35279-35289.
16. Esmaeil Zadeh I. et al. //ACS Photonics. – 2020. – Т. 7. – №. 7. – С. 1780-1787.
17. Chang J. et al. //APL Photonics. – 2021. – Т. 6. – №. 3. – С. 036114.
18. Elshaari A. W. et al. //APL Photonics. – 2020. – Т. 5. – №. 11. – С. 111301.
19. Korzh B. et al. //Nat. Photonics. – 2020. – Т. 14. – №. 4. – С. 250-255.
20. Guo S. et al. //Sci. Reports. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-8.
21. Charaev I. et al. //J. of Appl. Phys. – 2017. – Т. 122. – №. 8. – С. 083901.