

Влияние энергии осаждаемого материала на сверхпроводящие свойства пленки WSi

Д.Д.Васильев, Е.И.Малеванная, К.М.Моисеев, * ** ***Ф.И.Золотов,
* **А.В. Антипов, * **Ю.Б. Вахтомин, * ** ***К.В. Смирнов
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1;
*Москва, МПГУ, ул. Пироговская, д. 1;
**Москва, ООО «Сконтел», ул. Льва Толстого, д. 5/14;
***Москва, НИУ ВШЭ, ул. Мясницкая, д. 20
e-mail: d.d.vasiliev@bmstu.ru, k.moiseev@bmstu.ru

Благодаря аморфной структуре пленки WSi имеют преимущества по созданию SNSPD большой активной площади или массива детекторов на одной подложке. Как и у пленок NbN, сверхпроводящие свойства ультратонких пленок WSi существенно зависят от структуры и толщины. Научные группы, исследующие пленки WSi, в основном, уделяли внимание только изменению толщины и соотношению материалов на подложке при комнатной температуре. В данной работе представлены эксперименты по определению влияния потенциала смещения на подложке, температуры подложки и пиковой мощности импульсного магнетронного распыления, которая является эквивалентом ионизации, мишени вольфрама, на поверхностное сопротивление и сверхпроводящие свойства ультратонких пленок WSi. Негативное влияние температуры подложки и положительное влияние потенциала смещения и коэффициента ионизации (пикового тока) позволяет подобрать наилучший режим формирования пленок WSi для SNSPD: температура подложки 297 К, потенциал смещения –60 В и пиковый ток 3,5 А.

Influence of deposited material energy on superconducting properties of a WSi film. D.D. Vasilev, E.I. Malevannaya, K.M. Moiseev, P.I. Zolotov, A.V. Antipov, Y.B. Vakhtomin, K.V. Smirnov. WSi thin films have the advantages for creating SNSPDs with a large active area or array of detectors on a single substrate due to the amorphous structure. The superconducting properties of ultrathin WSi films substantially depend on their structure and thickness, the same as it is with the NbN films. Scientific groups investigating WSi films mainly focused only on changes of their thickness and the ratio of the components on the substrate at room temperature. This paper presents experiments to determine the effect of the bias potential on the substrate, the temperature of the substrate, and the peak power of pulsed magnetron sputtering, which is the equivalent of ionization, a tungsten target, on the surface resistance and superconducting properties of WSi ultrathin films. The negative effect of the substrate temperature and the positive effect of the bias potential and the ionization coefficient (peak current) allow one to choose the best WSi film formation mode for SNSPD: substrate temperature 297 K, bias potential –60 V, and peak current 3.5 A.

Введение

Однофотонный сверхпроводниковый детектор (SNSPD–Superconducting Single Photon Detector) был разработан в 2001 году [1]. Такие детекторы используются в качестве счетчиков одиночных фотонов для безопасного распределения квантовых ключей в квантовой криптографии [2], в оптической космической связи [3], для тестирования CMOS микросхем [4], для визуализации глубины предмета высокого разрешения на дальних расстояниях [5], для создания коротковолновой инфракрасной однофотонной камеры [6] и др. Для ввода излучения в меандр используется одномодовое оптоволокно, толщина ядра которого варьируется в пределах от 9 до 11 мкм, поэтому активная область меандра изначально составляла от 10 до 11 мкм, тогда как сейчас она увеличилась до 14-16 мкм для уменьшения потерь излучения [7-11]. При наличии между источником фотонов и детектором воздушного пространства эффективнее использовать многомодовое оптоволокно, например, для применения в дозиметрии синглетно-кислородной люминесценции (SOLD –Singlet Oxygen Luminescence Dosimetry) [12]. Диаметр ядра многомодового оптоволокна начинается от 50 мкм, что требуется

применения детекторов с активной областью диаметром порядка 35 мкм и фокусирующих линз [13], или детекторов с активной областью порядка 50 мкм [14]. Использование матрицы детекторов позволит повысить параметры изображения камер на основе однофотонных детекторов [15]. Продемонстрированные возможности интегрирования детектора в фотонные [16] и плазмонные [17] схемы требуют создания массива детекторов на одной подложке с высокими выходными параметрами [18].

Изначально чувствительный элемент детектора – меандр – формировали на основе ультратонких поликристаллических пленок NbN [19]. Структура и свойства таких пленок крайне чувствительны к материалу подложки и режимам формирования, вследствие чего до настоящего времени не удается воспроизводимо формировать пленки NbN на относительно больших площадях подложки. Более перспективными представляются детекторы на основе аморфных пленок, таких как WSi [20], MoSi [21] и MoGe [22], которые существенно меньше зависят от материала подложки и структуры ее поверхности, а также менее критичны к дефектам самой пленки [23]. Детекторы на основе аморфных пленок WSi показывают высокую квантовую эффективность до 93% на телекоммуникационной длине волны 1550 нм [24]. Кроме того, благодаря меньшей ширине запрещенной зоны и структурной однородности детекторы на основе пленок WSi с аморфной структурой позволяют эффективно регистрировать фотоны среднего инфракрасного диапазона со стандартной шириной нанопроволоки порядка 100 нм [20], в то время как для регистрации фотонов среднего инфракрасного диапазона детекторами на основе пленок NbN требуется уменьшение ширины нанопроволоки до 30 нм, что усложняет технологический процесс их изготовления [25].

Параметры готового детектора зависят от свойств ультратонкой пленки чувствительного элемента, которые в свою очередь зависят от ее структуры. Пленки WSi переходят в сверхпроводящее состояние при температуре порядка 5 К, аморфной структуре и 25% содержании кремния [26]. При этом научные группы при отработке технологии формирования пленок WSi варьируют соотношением компонентов и толщиной пленки, осаждавая на подложку при комнатной температуре [20, 27-30]. Замечено, что пленки WSi имеют меньший критический ток на подложках MgO по сравнению с SiO_x и Si, в то время как температура перехода в сверхпроводящее состояние на этих подложках совпадает [30]. Анализ рентгеновской дифракции (XRD – X-ray diffraction) показал не интенсивный и широкий пик решеток WSi₂ (110) и W₅Si₃ (202). Измерения сопротивления пленки при приложении магнитного поля свидетельствуют об анизотропных свойствах у тонких пленок WSi, не характерных для аморфной структуры, что может говорить о наличии предпочтительной ориентации в пленках WSi [30]. Для пленок NbN проводились исследования по влиянию потенциала смещения на подложке [31], температуры подложки в районе 825°C [32] и комнатной [33], ионной стимуляции [34] на структуру и сверхпроводящие свойства, тогда как данные по влиянию энергии осаждаемого материала на структуру и свойства пленок WSi отсутствуют. В данной работе приводятся результаты исследования влияния технологических режимов процесса магнетронного распыления на сверхпроводящие свойства пленок WSi.

Описание эксперимента

Согласно зонной модели структуры пленки для несбалансированной магнетронной системы, структура пленки из зоны 1, для которой характерны конусообразные кристаллиты, разделенные пустотами, переходит в зону 2 (плотноупакованные столбчатые зерна) и 3 (рекристаллизованные зерна) при увеличении температуры подложки, потенциала смещения на подложке и потока ионов, падающих на подложку, по отношению к потоку конденсирующихся атомов на подложке (рис. 1) [35]. Исследование влияния всех трех факторов реализовано на установке ВУП-11М в МГТУ им. Баумана, модернизированной для формирования пленок WSi из двух источников магнетронного распыления [36]. В проводимом эксперименте значения температуры T_s подложки составляют 297, 447 и 597 К, потенциала смещения U_{bias} – 0, –30, –60 В. При формировании пленок WSi кремний распыляется в высокочастотном режиме, поэтому имеется возможность управлять только ионизацией W , распыляемого импульсным режиме. Степень ионизации W коррелирует с пиковым током в импульсе I_{peak} , значения которого приняты 0,5, 2,0 и 3,5 А на основании ранее проведенных исследований [37].

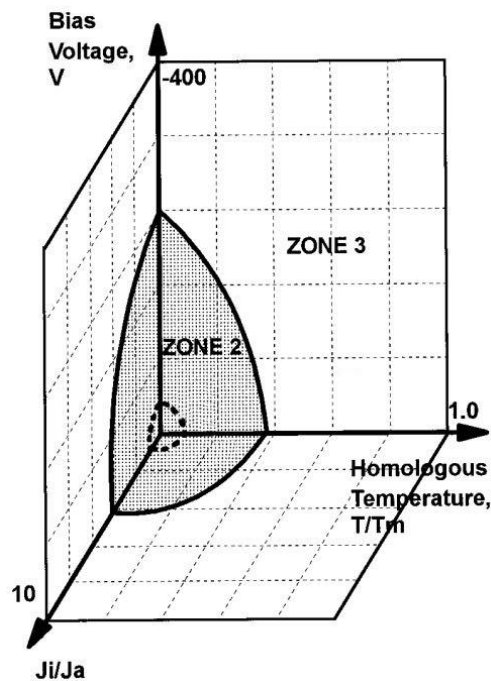


Рис. 1. Зонная модель структуры пленки для несбалансированной магнетронной системы [35].

Оценка влияния каждого фактора по отдельности и их взаимодействия проведена по методу полного факторного эксперимента (рис. 2). Для оценки влияния каждого фактора по отдельности проводятся три дополнительных эксперимента в точках со средним значением варьируемых факторов. Эксперименты проводятся при рабочем давлении $2,1 \cdot 10^{-3}$ мбар, потоке Ar 2,6 л/ч, времени осаждения 15 с, концентрации W 76%, удельной массе пленки $8,966 \cdot 10^{-5}$ кг/м², которая, по оценке, соответствует толщине 6 нм.

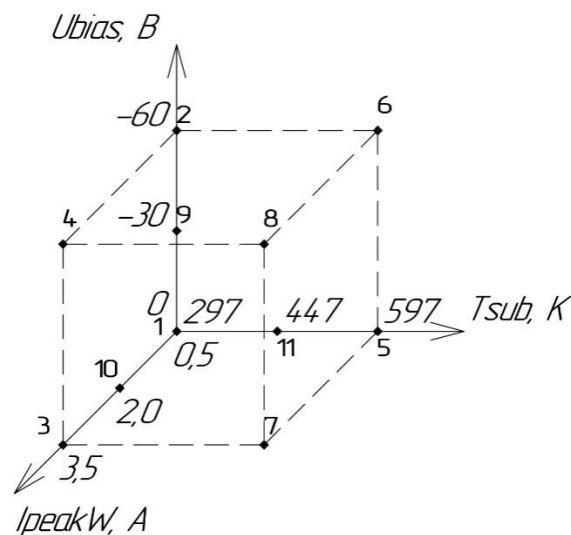


Рис. 2. Схема проведения полного факторного эксперимента.

Следует отметить, что при толщинах пленок менее 10 нм значение толщины существенно влияет на их поверхностное сопротивление и сверхпроводящие свойства [30]. Вследствие влияния исследуемых факторов на структуру, а, следовательно, на плотность получаемых пленок, которая будет изменять толщину пленок при одинаковой скорости осаждения, для исследования предложено формировать пленки с одинаковой удельной массой,

которая контролируется методом пьезоэлектрического микровзвешивания по разработанной ранее методике [38].

У полученных пленок WSi измерено поверхностное сопротивление R_s четырехзондовым методом, и сверхпроводниковые свойства при опускании образца внутрь откачиваемой вставки в криостате: критическая температура T_c , ширина перехода ΔT_c и коэффициент остаточного сопротивления RRR .

Результаты обсуждения

Поверхностное сопротивление R_s пленок WSi увеличивается с увеличением температуры подложки T_s и потенциала смещения U_{bias} . Пиковый ток I_{peak} не влияет на поверхностное сопротивление (рис. 3).

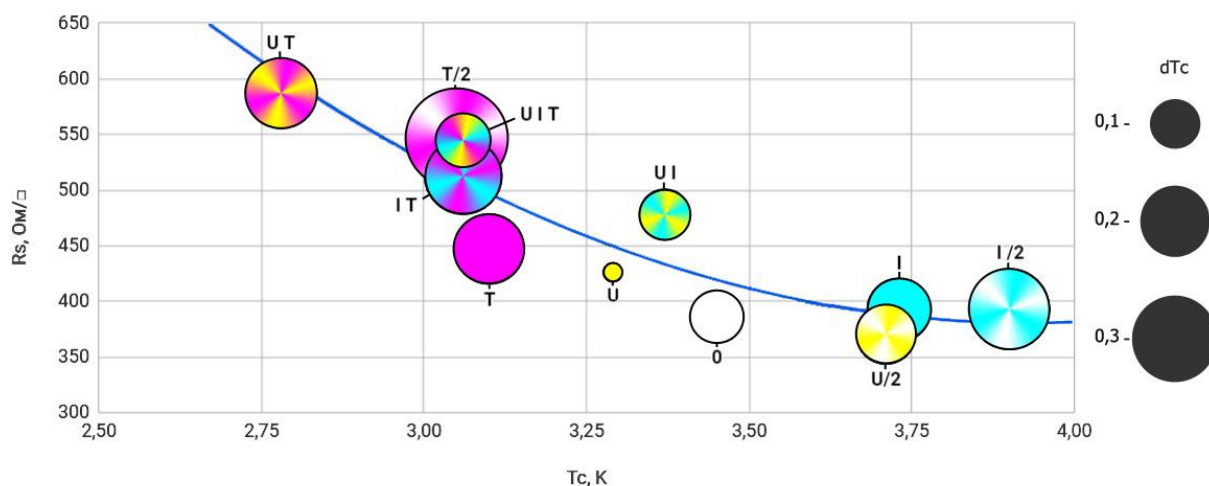


Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления от температуры перехода пленки, размером является ширина перехода.

Температура перехода T_c уменьшается при увеличении температуры подложки T_s и потенциала смещения U_{bias} , и увеличивается при увеличении пикового тока I_{peak} .

Варьируемые факторы не влияют на коэффициент остаточного сопротивления RRR (таблица 1). Зависимости ширины перехода в сверхпроводящее состояние dT_c от варьируемых факторов также не обнаружено (рис. 3).

Таблица 1. Поверхностное сопротивление и сверхпроводящие свойства образцов.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Факторы	–	U	I	UI	T	UT	IT	UIT	U/2	I/2	T/2
R_s, Ом/□	387	426	392	478	447	587	513	545	370	393	546
T_c, К	3,45	3,29	3,73	3,37	3,10	2,78	3,06	3,06	3,71	3,90	3,05
RRR	0,95	0,96	0,94	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,96	0,95	0,95
dT, К	0,12	0,07	0,17	0,12	0,20	0,20	0,24	0,13	0,15	0,26	0,38

В результате увеличение температуры подложки увеличивает поверхностное сопротивление пленки и уменьшает критическую температуру, что может быть связано с образованием нежелательных связей между частицами осаждаемого материала и элементами остаточной атмосферы или материалом подложки.

Увеличение потенциала смещения повышает поверхностное сопротивление без изменения сверхпроводящих свойств пленки, что может позволить улучшить отношение сигнал/шум детектора.

Увеличение пикового тока при распылении W повышает критическую температуру без изменения поверхностного сопротивления, и может привести к увеличению плотности критического тока, что может оказать положительное влияние на параметры детектора: отношение сигнал/шум и эффективность генерации импульса.

Коэффициент остаточного сопротивления RRR пленок WSi , в отличие от NbN , изменяется от 0,94 до 0,96, что не позволяет рассматривать данный параметр в качестве инструмента для улучшения выходных характеристик детектора.

Заключение

Формирование пленки WSi при температуре подложки 297 К, потенциале смещения -60 В и пиковом токе W 3,5 А комплексно увеличивает поверхностное сопротивление пленки R_s и критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние T_c , что может положительно сказаться на улучшении отношения сигнал-шум детектора, и способствовать повышению эффективности генерации импульса пленкой. Однако для полной оценки влияния факторов на параметры детектора необходимо провести исследования влияния факторов на плотность критического тока и выходных параметров детектора.

Благодарности

Данная работа была поддержана в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) № 18-12-00364.

Литература

1. Gol'tsman G, Okunev O, Chulkova G, Lipatov A, Semenov A, Smirnov K, Voronov B, Dzardanov A, Williams C and Sobolewski R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79**, 705.
2. Hoi-Kwong L, Curty Mand Tamaki K 2014 *Nat. Photonics* **8**, 595–604.
3. M. Grein, E. Dauler, A. Kerman, M. Willis, B. Romkey, B. Robinson, D. Murphy, and D. Boroson, "A superconducting photoncounting receiver for optical communication from the Moon," SPIE, 2015.
4. Zhang J, Boiadjieva N, Chulkova G, Deslandes H, Gol'tsman G, Korneev A, Kouminov P 2003 *Electronics Letters* **39**(14) 1086.
5. Aongus McCarthy, Nils J. Krichel, Nathan R. Gemmell, Ximing Ren, Michael G. Tanner, Sander N. Dorenbos, Val Zwiller, Robert H. Hadfield and Gerald S. Buller 2013 *Opt. Express* **21**, 8904.
6. Thomas Gerrits, Daniel J. Lum, Varun Verma, John Howell, Richard P. Mirin, and Sae Woo Nam 2018 *Opt. Express* **26**, 15519 .
7. Iman Esmaeil Zadeh, Johannes W. N. Los, Ronan B. M. Gourgues, Violette Steinmetz, Gabriele Bulgarini, Sergiy M. Dobrovolskiy, Val Zwiller, and Sander N. Dorenbos 2017 *APL Photonics* **2**, 111301.
8. Lixing You, Jia Quan, Yong Wang, Yuexue Ma, Xiaoyan Yang, Yanjie Liu, Hao Li, Jianguo Li, Juan Wang, Jingtao Liang, Zhen Wang, and Xiaoming Xie 2018 *Opt. Express* **26**, 3 2965.
9. Li Chen, Dirk Schwarzer, Jascha A. Lau, Varun B. Verma, Martin J. Stevens, Francesco Marsili, Richard P. Mirin, Sae Woo Nam, and Alec M. Wodtke 2018 *Opt. Express* **26**, 1214859.
10. Francesco Bellei, Alyssa P. Cartwright, Adam N. McCaughan, Andrew E. Dane, Faraz Najafi, Qingyuan Zhao, and Karl K. Berggren 2016 *Opt. Express* **24**, 43248.
11. P. Zolotov, A. Divochiy, Yu. Vakhtomin, M. Moshkova, P. Morozov, V. Seleznev, and K. Smirnov 2018 *AIP Conference Proceedings* **1936**, 020019.
12. Nathan R. Gemmell, Aongus McCarthy, Michele M. Kim, Israel Veilleux, Timothy C. Zhu, Gerald S. Buller, Brian C. Wilson, and Robert H. Hadfield 2017 *J. Biophotonics* **10**, 2, 320.
13. Dengkuan Liu, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Lixing You, Zhen Wang, and Hirotaka Terai 2014 *Opt. Express* **22**, 18, 21167.

14. Hao Li, Lu Zhang, LixingYou, Xiaoyan Yang, Weijun Zhang, Xiaoyu Liu, Sijing Chen, Zhen Wang, and XiaomingXie 2015 *Opt. Express*23, 13, 17301.
15. T. Gerrits, S. Allman, D. J. Lum, V. Verma, J. Howell, R. Mirin, and S. W. Nam, "Progress toward a high-resolution single-photon camera based on superconducting single photon detector arrays and compressive sensing," in CLEO: 2015, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper STh3O.6.
16. F. Lenzini, N. Gruhler, N. Walter, W. H. P. Pernice 2018 *Adv. Quantum Technol.*1, 1800061.
17. Reinier W. Heeres, Leo P. Kouwenhoven & Valery Zwiller 2013 *Nat. Nanotechnology*8, 719.
18. M. S. Allman, V. B. Verma, M. Stevens, T. Gerrits, R. D. Horansky, A. E Lita, F. Marsili, A. D. Beyer, M. D. Shaw, D. Kumor, R. Mirin, and S. W. Nam 2015 *Proc. SPIE* 9504, Photon Counting Applications 2015, 950402.
19. J. R. Gao and M. Hajenius 2007 *Appl. Phys. Lett.*91, 062504.
20. BurmBaek, Adriana E. Lita, Varun Verma, and Sae Woo Nam 2011 *Appl. Phys. Lett.*98, 251105.
21. Korneeva Y P, Mikhailov M Y, Pershin Y P, Manova N N, Divochiy A V, Vakhtomin Y B, and Goltsman G N 2014 *Superconductor Science and Technology*27, 095012.
22. V. B. Verma, A. E. Lita, M. R. Vissers, F. Marsili, D. P. Pappas, R. P. Mirin, and S. W. Nam 2014 *Appl. Phys. Lett.*105, 022602.
23. Lita, A., Verma, V., Horansky, R., Shainline, J., Mirin, R., & Nam, S. (2015). Materials Development for High Efficiency Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors. *MRS Proceedings*, 1807, 1-6.
24. Marsili F, Verma V B, Stern J A, Harrington S, Lita A E, Gerrits T and Nam S W 2013 *Nature Photonics*7(3) 210.
25. Francesco Marsili, Francesco Bellei, Faraz Najafi, Andrew E. Dane, Eric A. Dauler, Richard J. Molnar, Karl K. Berggren 2012 *Nano Lett.*20121294799-4804.
26. Kondo S 1992 *Journal of materials research*7(04), 853.
27. X. Zhang, A. Engel, Q. Wang, A. Schilling, A. Semenov, M. Sidorova, H.-W. Hübers, I. Charaev, K. Ilin, and M. Siegel 2016 *Phys. Rev. B* 94, 174509.
28. V A Seleznev, A V Divochiy, Yu B Vakhtomin, P V Morozov, P I Zolotov, D DVasil'ev, K M Moiseev, E I Malevannaya and K V Smirnov 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.*737 012032.
29. I. N. Florya, Yu. P. Korneeva, M. Yu. Mikhailov, A. Yu. Devizenko, A. A. Korneev, and G. N. Goltsman 2018 *Low Temperature Physics*44, 221.
30. JinJin, Fengfeng Fu, Xiaoqing Jia, Lin Kang, Zhihe Wang, Xuecou Tu, Labao Zhang 2019 *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*29, 5, 18483128.
31. Andrew E. Dane, Adam N. McCaughan, Di Zhu, Qingyuan Zhao, Chung-Soo Kim, NiccoloCalandri, Akshay, Agarwal, Francesco Bellei, and Karl K. Berggren 2017 *Appl. Phys. Lett.*111, 122601.
32. K Ilin et al 2008 *J. Phys.: Conf. Ser.* 97 012045.
33. Zhen Wang, Akira Kawakami, Yoshinori Uzawa, and Bokuji Komiyama 1996 *J Appl. Phys.*79, 7837.
34. Tomas Polakovic, Sergi Lendinez, John E. Pearson, Axel Hoffmann, Volodymyr Yefremenko, Clarence L. Chang, Whitney Armstrong, Kawtar Hafidi, Goran Karapetrov, and Valentine Novosad 2018 *APL Materials*6, 076107.
35. P. J. Kelly and R. D. Arnell 1998 *Journal of Vacuum Science & Technology A* 16, 2858.
36. D DVasilev et al 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.*872 012027.
37. М.Ю.Акишин, Е.И.Малеванная, Д.Д.Васильев, К.М.Моисеев. Исследование зависимости плотности пиковой мощности на магнетроне от параметров процесса импульсного магнетронного распыления // «Вакуумная наука и техника» Материалы XXIV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов под редакцией доктора технических наук, профессора С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА, 2017. – С.193-196.
38. Д.Д.Васильев, Е.И.Малеванная, К.М.Моисеев. Исследование скорости осаждение ультратонких сверхпроводящих пленок WSi при варьировании энергии частиц осаждаемого материала // «Вакуумная наука и техника» Материалы XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов под редакцией доктора технических наук, профессора С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА. 2018. – С.221-227.