

Исследование характеристик ультратонких сверхпроводящих пленок WSi

Т.Г.Константинова, М.Ю.Акишин, Д.Д.Васильев, К.М.Моисеев, *** ** Ф.И.Золотов,
*** ** К.В.Смирнов

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, 5;

*Москва, МПГУ, ул. Пироговская, д. 1;

**Москва, НИУ ВШЭ, ул. Мясницкая, д. 20;

***Москва, ООО «Сконтел», ул. Льва Толстого, д. 5/14

e-mail: t.g.konstantinova@mail.ru, k.moiseev@bmstu.ru

В работе проведено исследование сверхпроводящих характеристик тонких плёнок WSi для их дальнейшего использования в сверхпроводниковых однофотонных детекторах (SSPD). Представлены зависимости критической температуры T_c , поверхностного сопротивления R_s , ширины сверхпроводящего перехода dT_c , коэффициента остаточного удельного сопротивления RRR от процентного соотношения компонентов и толщины тонкой плёнки WSi.

Research of the characteristics of ultrathin superconducting WSi films. T.G.Konstantinova, M.Y. Akishin, D.D. Vasilev, K.M. Moiseev, P.I. Zolotov, K.V. Smirnov. The paper presents the investigation of the superconducting characteristics of thin WSi films which can be used in superconducting single photon detectors (SSPD). The dependences of the critical temperature T_c , the surface resistance R_s , the width of the superconducting transition dT_c , the residual resistivity ratio RRR on the percentage ratio of components and the thin film thickness WSi are presented.

Введение

К моменту открытия эффекта детектирования фотонов в сверхпроводниковых полосках фотонные детекторы разных типов уже имели широкое практическое применение (болометры TES, SPAD детекторы и др. [1,2]). Однако ввиду существенных недостатков, таких, как громоздкость, низкая скорость счета, ограниченность по длине волны, низкие значения квантовой эффективности, значительные темновые отсчёты, данные типы детекторов малоприменимы в квантовых системах связи [2]. Хорошей альтернативой полупроводниковым однофотонным детекторам являются однофотонные детекторы на основе сверхпроводников. Малая энергетическая щель в сверхпроводниках, порядка единиц мэВ, делает эти детекторы перспективными для работы в ИК диапазоне, где энергия одного фотона уменьшается до уровня, не позволяющего полупроводниковым приборам регистрировать одиночные кванты света.

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SSPD) [3] превосходят другие технологии инфракрасного однофотонного детектирования и широко применимы для работ с квантовой информацией и в квантовой оптике [4-7] благодаря своей высокой квантовой эффективности [8], низкому джиттеру [9] и малому значению темновых отсчётов [10].

При попадании фотона происходит образование резистивной области, в которой нарушаются сверхпроводниковые свойства плёнки. Следствием этого является резкое увеличение сопротивления, порождающее импульса напряжения на выходе. Для получения чёткого выходного сигнала необходимо высокое поверхностное сопротивление, и малое значение показателя RRR (отношение R_{300} к R_{20}) образца. Данная характеристика плёнки непосредственно зависит от толщины нанесённого покрытия. Так в [11] показано, что для более тонких плёнок (2 нм) поверхностное сопротивление значительно увеличивается, что может привести к невозможности перехода в сверхпроводящее состояние. Однако значительное увеличение толщины плёнки приводит к ненасыщению внутренней эффективности [12].

В данной работе рассматриваются характеристики тонкой сверхпроводящей плёнки WSi: поверхностное сопротивление R_s – критерий первоначального отбора; критическая

температура T_c – температура перехода из сверхпроводящего в резистивное состояние, показатель RRR – коэффициент остаточного удельного сопротивления плёнки; ширина сверхпроводящего перехода dT_c – характеристика скорости перехода в сверхпроводящее состояние. Предпочтительным является получение плёнок с наибольшим R_s , наименьшими параметрами RRR и dT_c , а также наибольшим T_c [13] ввиду того, что максимальная критическая температура T_{cWSi} всего 5 К.

Целью данной работы является исследование влияния толщины и состава плёнки на поверхностное сопротивление R_s , критическую температуру T_c , коэффициента RRR и ширину сверхпроводящего перехода dT_c тонких плёнок WSi .

Описание эксперимента

Нанесение плёнки проводится на установке ВУП-11М в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении». Для получения плёнок WSi применяется магнетронное распыление из двух мишеней (вольфрамовой и кремниевой), расположенных под углом 90° относительно друг друга. Подложка располагается на пересечении осей магнетронов. Вольфрам распыляется импульсным источником, а кремний – высокочастотным. Параметры процесса приведены в таблице 1. Подложка сапфировая диаметром $2''$ (50,8 мм).

Таблица 1 – Параметры нанесения WSi на сапфировую подложку $2''$.

Номер п/п	Параметр	Единица измерения	Значение
1	Мощность W	Вт	120
2	Мощность Si	Вт	110
3	Концентрация W в центре подложки	%	76
4	Поток аргона	л/ч	2,6
5	Толщина в центре подложки	нм	6
6	Температура подложки	$^\circ\text{C}$	24

Результаты эксперимента

Измерение поверхностного сопротивления

Ранее при тех же параметрах были нанесены на 9 резонаторов, расположенных на расстоянии 18 мм друг от друга (рис. 1) отдельно плёнки W, Si и WSi для определения толщины и соотношения компонентов в каждой точке. Результаты представлены на рис. 2.

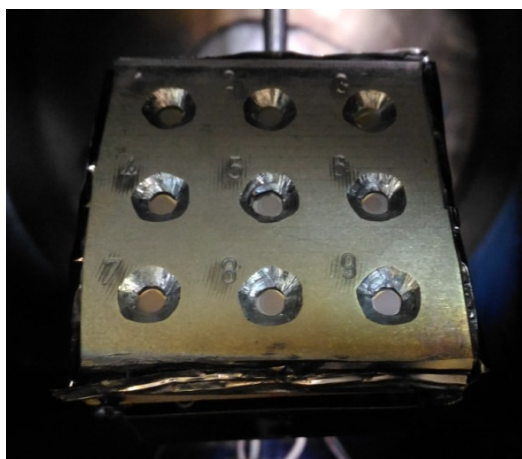


Рис. 1. Расположение резонаторов для измерения толщины и соотношения компонентов.

На рис. 2 представлено распределение толщины и соотношения компонентов. Можно заметить увеличение концентрации W вдоль вертикальной координаты y , что объясняется особенностью расположения магнетронов [14].

Поверхностное электрическое сопротивление контролировалось 4-х зондовым микроскопом, тип M2.600.002, погрешность прибора составляет 0,1%. Данные приведены в таблице 2.

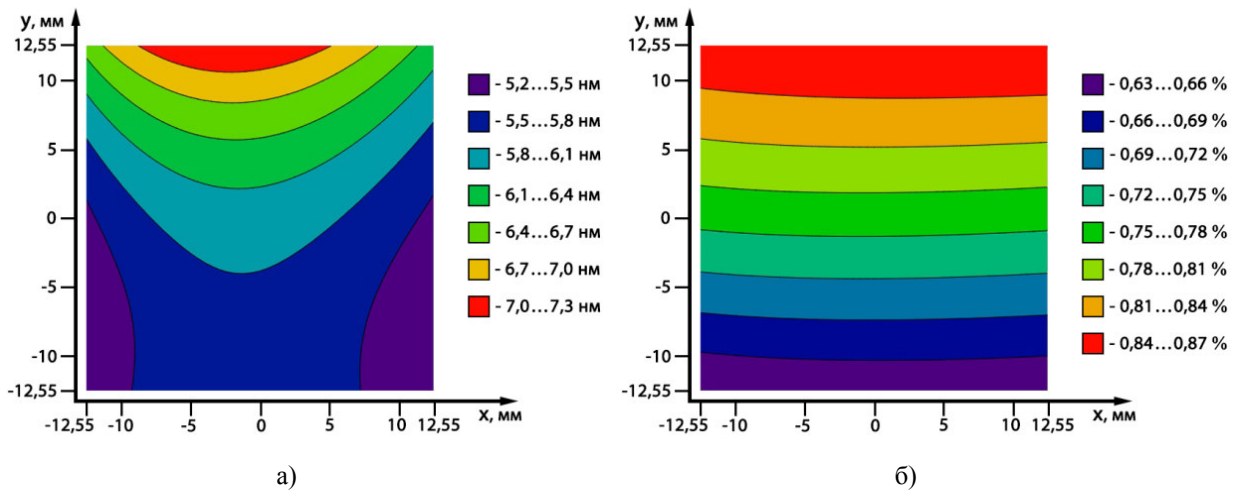


Рис. 2. Параметры покрытия WSi: а) толщина; б) отношение по толщине $W/(W+Si)$.

Таблица 2. Распределение удельного сопротивления R_s (Ом/□) от координаты.

Координаты на подложке, мм	-12,550	-6,275	0	6,275	12,550	17,700
12,550	-	-	342	-	364	-
6,275	-	359	345	340	-	-
0	434	392	377	376	382	414
-6,275	-	477	447	450	-	-
-12,550	648	-	549	-	586	-
-17,700	-	-	697	-	-	-

Построенная зависимость поверхностного сопротивления от координаты на подложке (рис.3, а) показывает смещение центра относительно точки (0;0).

Измерение критической температуры

Для измерения критической температуры были выбраны 7 точек (табл. 3). Для определения максимальной температуры была построена зависимость критической температуры от координаты с указанием черных точек измерения пленки (рис. 3, б). Максимальная критическая температура $T_c=3,9$ К наблюдается при толщине плёнки $h=4,87$ нм и содержании $W=79,5\%$. Данная зависимость подтверждает ранее полученные значения для толстых плёнок [13]. Для данного соотношения ширина сверхпроводящего перехода составляет $dT_c=0,1$ К, коэффициент остаточного удельного сопротивления $RRR=0,98$, поверхностное сопротивление $R_s=430$ Ом/□.

Таблица 3 – Распределение критической температуры $T_c(K)/dT_c(K)/RRR$ от координаты (мм)

Координаты на подложке, мм	-12,55	0	12,55
12,550	—	3,60/0,10/0,98	—
6,275	—	3,83/0,15/0,97	—
0	3,55/0,20/0,96	3,70/0,16/0,96	3,80/0,10/0,96
-6,275	—	3,30/0,31/0,94	—
-12,550	—	2,62/0,28/0,94	—

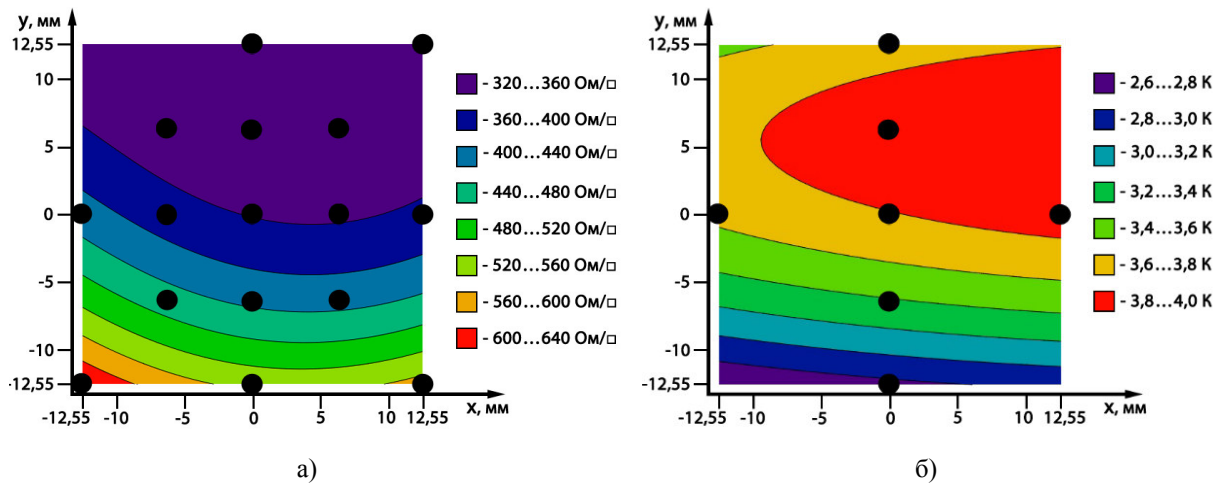


Рис. 3. Распределение по подложке: а) R_s ; б) T_c .

По графикам $R(T)$ для каждой точки определялись dT_c и RRR (рис.4).

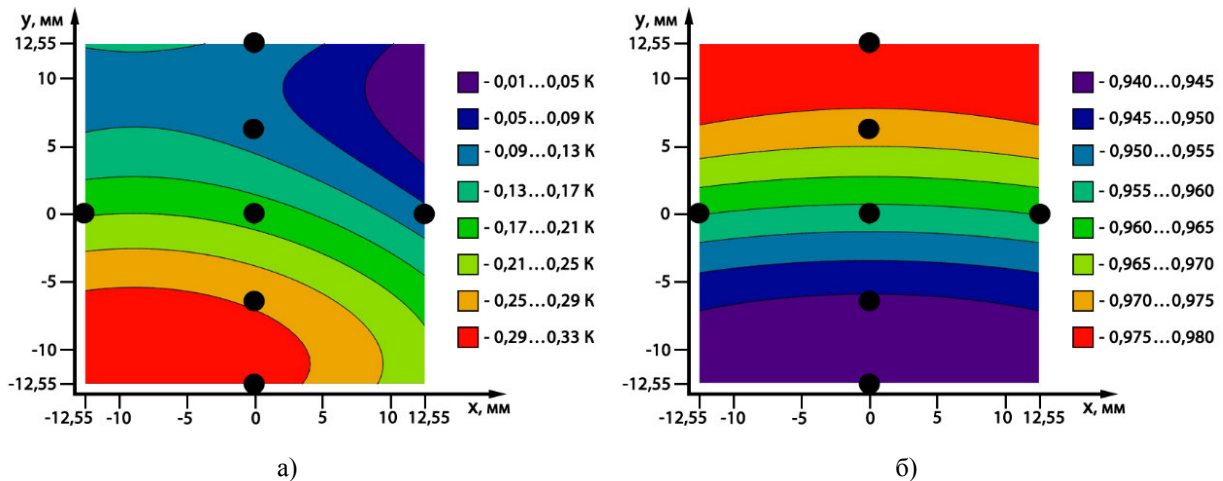
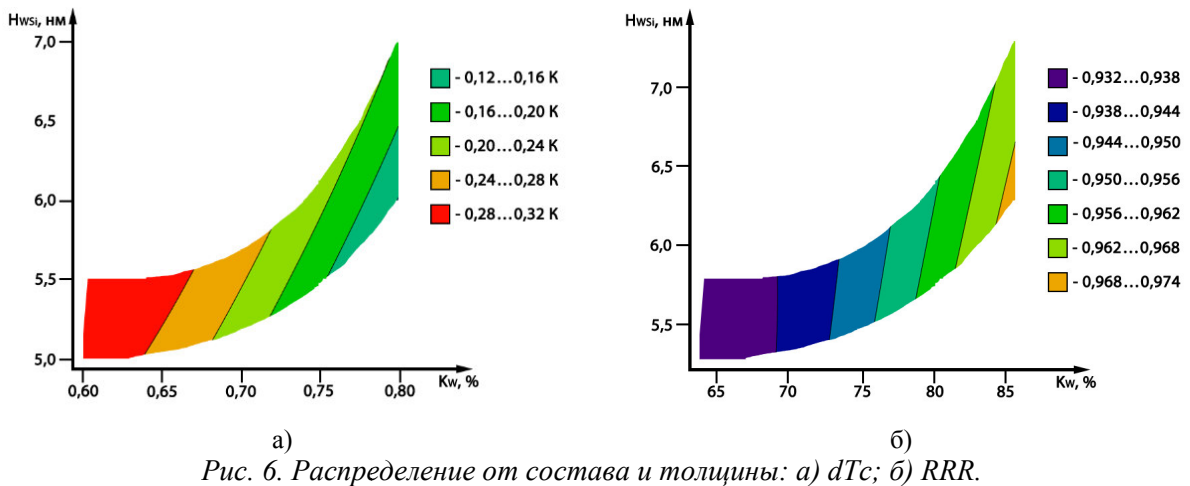
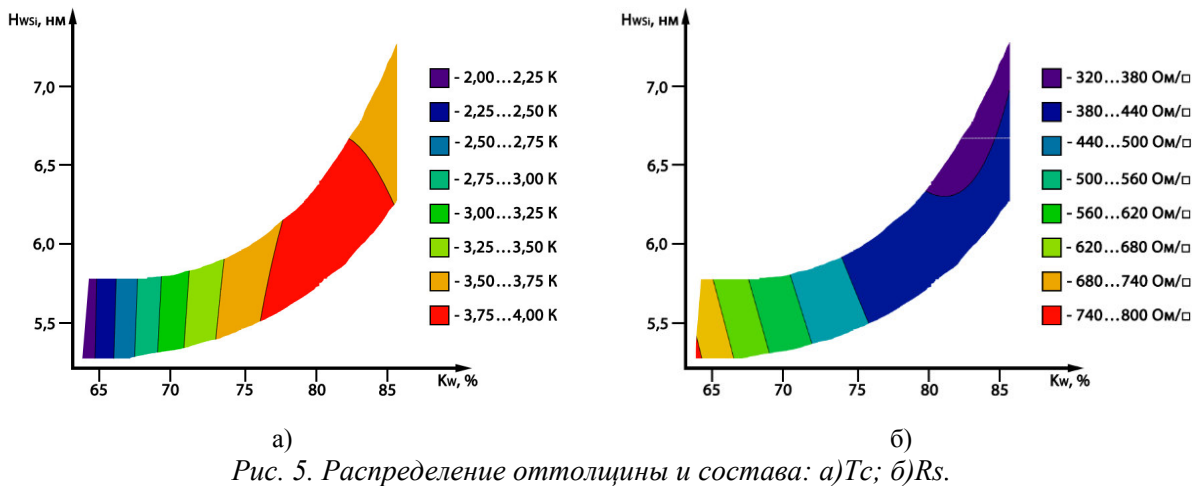


Рис. 4. Распределение по подложке: а) dT_c ; б) RRR .

Обработка измерений

В программе MathCAD построена регрессионная зависимость поверхности T_c , R_s , dT_c и RRR от толщины и соотношения компонентов пленки WSi . В связи с тем, что при обработке результатов одному значению толщины и соотношения компонентов соответствует несколько значений выходных параметров, на рисунках показана область – соответствующая проекции «облака» результатов. За пределами облака поверхность экстраполируется не адекватно, из-за чего она не показана. По поверхности температуры перехода в сверхпроводящее состояние (рис. 5, а) можно видеть концентрацию вольфрама в плёнке, соответствующую 80%, при которой наблюдается максимальная температура. Значение поверхностного сопротивления пленки (рис. 5, б) уменьшается с увеличением концентрации вольфрама и толщины пленки. Ширина перехода в сверхпроводящее (рис. 6, а) состояние уменьшается с увеличением концентрации вольфрама и уменьшением толщины пленки. Коэффициент RRR (рис. 6, б) увеличивается при увеличении концентрации вольфрама и уменьшении толщины пленки.



Заключение

Максимальная критическая температура $\max T_c = 3,92$ К наблюдается при толщине плёнки $h = 4,87$ нм и содержании $W = 79,5\%$, при этом $dT_c = 0,1$ К, $RRR = 0,98$, $R_s = 430$ Ом/□.

Одному значению толщины и соотношения компонентов соответствует несколько значений выходного параметра, что, вероятно, связано с неравномерностью распределения покрытия, когда одна толщина и соотношение компонентов формируется при разной скорости осаждения, углом конденсации и другими параметрами.

Увеличение концентрации вольфрама и уменьшение толщины пленки уменьшает dT_c и увеличивает RRR . При увеличении концентрации вольфрама и увеличении толщины пленки уменьшает R_s . Наблюдается «хребет» T_c при концентрации вольфрама 81%.

При отработке технологии формирования покрытия WSi необходимо не только обеспечивать требуемую толщину пленки и концентрацию вольфрама, но и подбирать режим осаждения для получения высоких выходных параметров.

В дальнейшем планируется экспериментально проверить рассчитанное в данной работе значение максимальной критической температуры на подложке, после чего сформировать детекторы на ее основе и исследовать их параметры.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №18-12-00364).

Литература

1. K.D. Irwin and G. C. Hilton. Transition-edge sensors // *Cryogenic Particle Detection*. –2005.–Ed. C. Enss, Springer.
2. H.-A. Bachor T.C. Ralph. A Guide to experiments in Quantum Optics//Wiley-VCH. –2004.– 2nd ed., Ch. 7.
3. G. Gol'tsman et. al. Fabrication and Properties of an Ultrafast NbN Hot-Electron Single-Photon Detector// *IEEE Transactions on applied superconductivity*.–2001.– Vol.11.No1.
4. H. Takesue, S. W. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, and Y. Yamamoto. Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors// *Nat. Photonics*. –2007. –Vol. 1, 343.
5. J. Chen, J. Altepeter, M. Medic, K. Lee, B. Gokden, R. Hadfield, S. Nam, and P. Kumar. Demonstration of a Quantum Controlled-NOT Gate in the Telecommunications Band// *Phys. Rev. Lett.*–2008.–Vol.100, 133603.
6. C. Clausen, I. Usmani, F. Bussières, N. Sangouard, M. Afzelius, H. de Riedmatten, and N. Gisin. Quantum storage of photonic entanglement in a crystal//*Nature*. –2011.–Vol. 469, 508.
7. M. J. Stevens, B. Baek, E. A. Dauler, A. J. Kerman, R. J. Molnar, S. A. Hamilton, K. K. Berggren, R. P. Mirin, and S. W. Nam. High-order temporal coherences of chaotic and laser light.//*Opt. Express*. –2010.–Vol. 18,1430.
8. Marsili, F., et al., Detecting single infrared photons with 93% system efficiency// *Nat Photon.*–2013. –Vol.7.– P. 210.
9. V. Shcheslavskiy, P. Morozov, A. Divochiy, Yu. Vakhtomin, K. Smirnov and W. Becker. Ultrafast time measurements by time-correlated single photon counting coupled with superconducting single photon detector// *Rev. Sci. Instrum.* – 2016. – Vol.87, 053117.
10. H. Le Jeannic, V.B. Verma, A. Cavallès, F. Marsili, M.D. Shaw, K. Huang, O. Morin, S.W. Nam, J. Laurat. High-efficiency WSi superconducting nanowire single-photon detectors for quantum state engineering in the near infrared// *Optics Letters*. –2016.–Vol. 41, 5341.
11. K. Smirnov, A. Divochiy, Y. Vakhtomin, P. Morozov, P. Zolotov, A. Antipov and V. Seleznev. NbN single-photon detectors with saturated dependence of quantum efficiency// *Supercond. Sci. Technol.*–2018.–Vol. 31, 035011.
12. I.E. Zadeh et al. Single-photon combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution// *APL Photonics*.–2017.–Vol. 2, 111301.
13. Seiichi Kondo. Superconducting characteristics and the thermal stability of tungsten-based amorphous thin films// *J. Mater. Res.*–1992.– Vol.7, No. 4.
14. V.A. Seleznev, A.V. Divochiy, Yu.B. Vakhtomin, P.V. Morozov, P.I. Zolotov, D.D. Vasil'ev, K.M. Moiseev, E.I. Malevannaya and K.V. Smirnov. Superconducting detector of IR single-photons based on thin WSi films. // *Journal of Physics Conference Series*.–2016.– Vol.737, No. 1.