

Обеспечение равномерности толщины ультратонких плёнок WSi при магнетронном распылении из двух источников

С. Хыдырова, М.Ю. Акишин, Д.Д. Васильев, К.М. Моисеев
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
e-mail: hydyrovas@yandex.ru, d.d.vasiliev@bmstu.ru, k.moiseev@bmstu.ru

Для достижения высоких выходных характеристик однофотонных детекторов на основе плёнок WSi необходима высокая равномерность толщины плёнки более 95%. В работе представлено проведенное на основании экспериментально определенного потока от одного магнетрона математическое моделирование неравномерности толщины ультратонких плёнок WSi, формируемых магнетронным распылением из двух источников, в зависимости от расположения магнетронов относительно подложкодержателя. По результатам моделирования неравномерности выдвинуты требования к конструкции и расположению в камере магнетронного узла, при которых обеспечивается требуемая неравномерность толщины плёнки менее 5%.

Providing of ultra-thin film thickness uniformity by magnetron sputtering from two sources. S. Hydyrova, M.Yu. Akishin, D.D. Vasilev, K.M. Moiseev. To achieve high characteristics of single-photon detectors based on WSi thin films it is necessary to provide high film thickness uniformity more than 95%. This paper presents a mathematical modeling of the thickness uniformity of an ultra-thin film formed by magnetron sputtering from two sources, based on an experimentally determined mass flow from a single magnetron, depending on the location of the magnetrons relative to the substrate holder. According to the results of non-uniformity modeling, the requirements for the design and location of the magnetron unit in the chamber were made, which ensured the required non-uniformity of the film thickness of less than 5%.

Введение

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы на основе нанопроволоки (SNSPD) предназначены для детектирования излучения (одиночных фотонов) видимого (400...780 нм) и ближнего ИК-диапазона (0,74...2,5 мкм). SNSPD применяются в качестве счетчиков фотонов в различных областях: в квантовой криптографии, в оптической когерентной томографии и квантовой оптической когерентной томографии, в ЛИДАР-системах, при астрономических исследованиях, а также при тестировании микросхем [1]. Перспективным является применение SNSPD в оптических квантовых вычислениях, так как для реализации квантовой оптической интегральной схемы необходимы источник фотонов, логические элементы и приемник (детектор) фотонов [2]. Кроме того, SNSPD востребованы в оптических системах дальней космической связи [3].

Однофотонные детекторы на основе сверхпроводников обладают преимуществами перед альтернативными в связи с более широким спектральным диапазоном детектирования, высокой квантовой эффективностью, большим быстродействием и меньшим числом темновых отсчетов, а также более высокими рабочими температурами [1, 4].

Одним из наиболее перспективных материалов чувствительного элемента SNSPD является WSi [5], детекторы на основе которого демонстрируют высокую квантовую эффективность до 93% [6].

Толщины сверхпроводящих плёнок для SNSPD составляет менее 10 нм [7]. При таких значениях наблюдается сильное изменение сверхпроводящих параметров материала в зависимости от толщины [8], что обуславливает значительное влияние толщины плёнки на выходные характеристики детектора: квантовую эффективность, быстродействие, рабочую температуру, число темновых отсчетов [9, 10, 11]. В связи с этим для обеспечения воспроизводимости выходных характеристик детектора необходимо получение плёнок с высокой равномерностью толщины более 95%.

Одним из наиболее распространенных методов формирования сверхпроводящих ультратонких плёнок для SNSPD, применяемых в том числе в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении», является магнетронное распыление. Формирование плёнки WSi в нашей лаборатории осуществляется на установке ВУП-11М [12] распылением мишеней W и Si двух магнетронов. Угол между осью каждого из магнетронов и подложкодержателем составляет 45° . Центр подложкодержателя совпадает с пересечением осей магнетронов [12]. В [13] показано, что реализация вращения подложкодержателя при данном расположении магнетронов обеспечит требуемую неравномерность толщины плёнки менее 5%. Однако нынешнее расположение подложкодержателя в камере (в плоскости, расположенной под углом к оси вакуумного ввода подложкодержателя) не позволяет осуществлять вращение подложкодержателя, в связи с чем формируемые двухкомпонентные плёнки обладают высокой неравномерностью толщины и состава по подложке.

Для обеспечения неравномерности толщины плёнки менее 5% целесообразно изменить компоновку и расположить два магнетрона на одном фланце камеры симметрично относительно подложки, а подложкодержатель – на противоположном фланце, что позволит реализовать вращение подложкодержателя и снизить неравномерность толщины и состава плёнки.

В данной работе рассматривается способ обеспечения требуемой неравномерности толщины двухкомпонентной плёнки менее 5% посредством вновь разрабатываемой конструкции магнетронного узла. Для выдвигания требований к конструкции магнетронного узла (определения расстояния между осями магнетронов и угла наклона оси магнетрона относительно оси подложкодержателя) проводится моделирование неравномерности толщины плёнки при совместном распылении из двух источников.

Экспериментальное определение пространственного распределения потока W от одного магнетрона

Моделирование неравномерности толщины в зависимости от взаимного расположения магнетронов и подложкодержателя проводится на основании регрессионной модели пространственного распределения потока от одного магнетрона, полученной на основании экспериментального измерения скорости осаждения.

Чтобы определить поток материала от одного магнетрона, с помощью метода пьезоэлектрического микровзвешивания [14] определяется масса, осажденная на закрепляемые в 9 экспериментальных точках (рис. 1а) на подложкодержателе кварцевые резонаторы. Осаждение вольфрама W проводилось при пяти различных расстояниях между подложкодержателем и магнетроном: 50, 70, 90, 110 и 130 мм (рис. 2б). Формирование плёнки вольфрама магнетронным распылением проводится на установке ВУП-11М. Параметры режима осаждения плёнки вольфрама [15] приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры режима осаждения плёнки W магнетронным распылением.

Параметр	Значение
Сигнал	Импульсный
Мощность, Вт	120
Частота, кГц	15
Коэффициент заполнения, %	80
Поток аргона, л/ч	1,56
Предельное давление, 10^{-5} мбар	1,1
Время тренировки мишени, мин	5
Время нанесения, мин	2

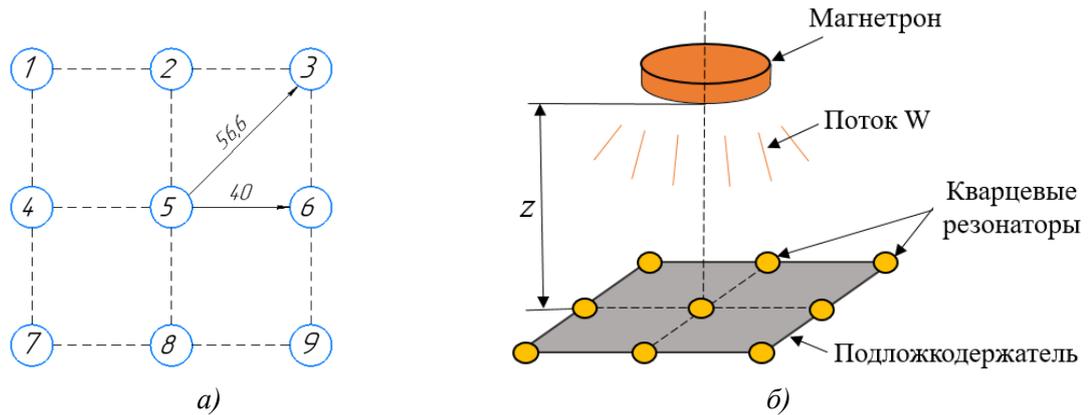


Рис. 1. Схема расположения экспериментальных точек: а) расположение подложкодержателя относительно магнетрона; б) расположение кварцевых резонаторов на подложкодержателе.

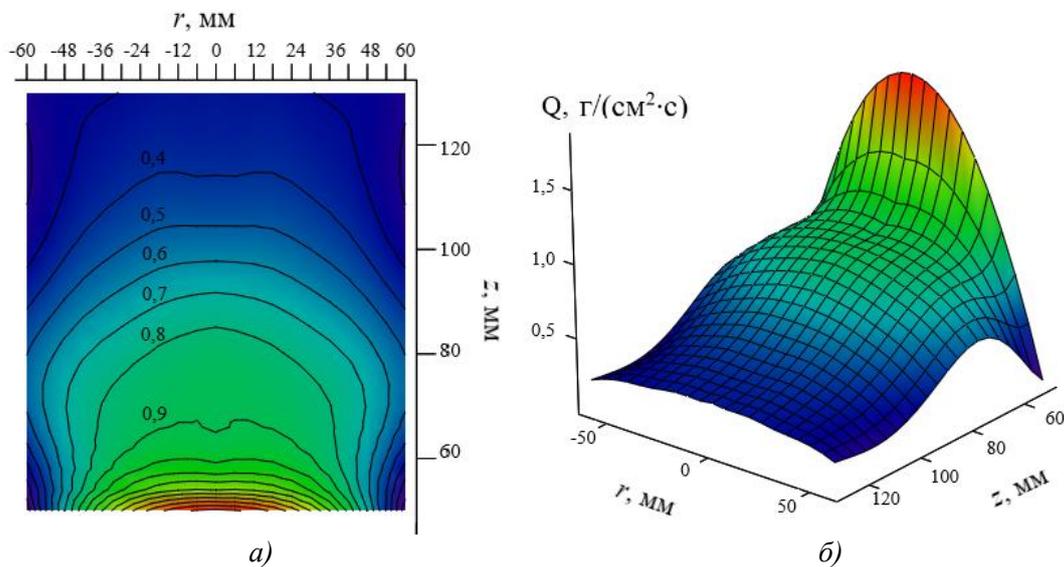


Рис. 2. Регрессионная модель зависимости потока Q [$\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$] от радиуса r и высоты z (расположение магнетрона соответствует началу координат): а) линии уровня; б) график поверхности.

В результате проведенных экспериментов рассчитана удельная масса осаждаемой в каждой из экспериментальных точек плёнки. Поток Q [$\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$] определяется из отношения удельной массы к времени t осаждения плёнки, рассчитанные значения потока в экспериментальных точках для расстояний z от магнетрона представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения потока Q [$\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$] W в экспериментальных точках.

№ резонатора	$z_1 = 50$ мм	$z_2 = 70$ мм	$z_3 = 90$ мм	$z_4 = 110$ мм	$z_5 = 130$ мм
1	0,491	0,339	0,337	0,274	0,187
2	0,984	0,447	0,478	0,309	0,245
3	0,536	0,354	0,444	0,252	0,240
4	0,884	0,618	0,492	0,415	0,279
5	2,086	0,958	0,763	0,450	0,339
6	0,808	0,607	0,534	0,286	0,289
7	0,537	0,501	0,417	0,321	0,248
8	0,799	0,603	0,570	0,322	0,285
9	0,510	0,395	0,386	0,219	0,236

Математическая модель зависимости потока материала от пространственных координат относительно магнетрона получена на основании экспериментальных значений потока Q с помощью регрессионного анализа в среде Mathcad.

С помощью функции регрессии полиномом третьего порядка построены регрессионные модели потока Q в зависимости от расположения точки на подложкодержателе в декартовых координатах x, y . Найдены координаты экстремумов функций, чтобы исключить влияние погрешности закрепления центрального резонатора на подложкодержателе (несоответствие центра резонатора 5 и оси магнетрона (рис. 1 а, б)). Затем координаты экспериментальных точек 1...9 для каждой высоты закрепления подложкодержателя z переводятся в полярные координаты r и φ и значения потока Q усредняются по углу φ согласно теореме о среднем. Таким образом, получены функции зависимости потока $Q(r)$ от радиуса относительно оси магнетрона для каждой высоты.

Полученные кривые $Q(r)$ при значениях высот $z_1 - z_5$ объединяются функцией регрессии в модель пространственного распределения потока материала Q в заданной точке от одного магнетрона в зависимости от радиуса r и высоты z (рис. 2), где r и z – радиус и высота в цилиндрических координатах относительно магнетрона. Расположение магнетрона соответствует началу координат на графиках.

Полученное пространственное распределение потока материала от одного магнетрона Q позволяет смоделировать зависимость неравномерности толщины плёнки от взаимного расположения подложки и магнетронов при распылении из двух источников.

Моделирование неравномерности толщины в зависимости от расположения магнетрона относительно подложки

Для моделирования неравномерности толщины плёнки в зависимости от расположения подложки относительно магнетрона координаты r и z выражаются через угол β и расстояния B и L (рис. 3).

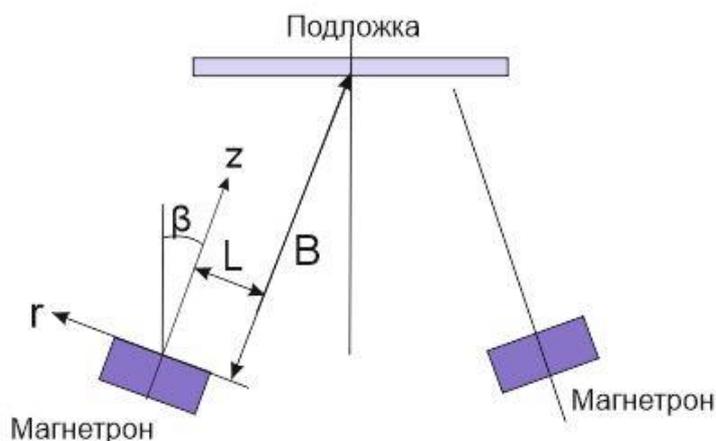


Рис. 3. Расчетная схема расположения подложки относительно магнетронов.

На основании распределения потока в Mathcad построена модель неравномерности толщины плёнки Δ и модель удельной массовой скорости осаждения плёнки (что эквивалентно потоку Q) при распылении из двух источников в зависимости от L и B при значениях угла β от 0 до 45° с шагом 5°, диапазоны варьирования L от 0 до 40 мм, B от 90 до 130 мм.

Из 10 полученных графиков поверхности неравномерности Δ в зависимости от расстояний L и B выявлено, что наименьший угол β , при котором обеспечивается Δ менее 5%, равен 5°. С увеличением β увеличиваются диапазоны B и L , в которых выполняется условие $\Delta < 5\%$, и эти области смещаются в сторону меньших значений B .

Исходя из графиков зависимости скорости осаждения от B и L при различных β получено, что влияние угла β на скорость осаждения незначительно. Скорость осаждения снижается с увеличением расстояния B и эксцентриситета L .

Помимо неравномерности толщины плёнки $\Delta < 5\%$ расположение магнетронов в камере должно обеспечивать высокую скорость осаждения плёнки. Угол наклона магнетрона β должен быть наименьшим для размещения магнетронного узла в камере установки ВУП-11М. Исходя из этих требований, на основании моделирования неравномерности и скорости осаждения выбран угол $\beta = 10^\circ$. При $\beta = 10^\circ$ неравномерность менее 5% обеспечивается при расстоянии $B = 105 \dots 120$ мм и эксцентриситете $L = 0 \dots 5$ мм. В выбранном диапазоне наибольшая скорость осаждения $0,496 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ достигается при $L = 0$ мм и $B = 105$ мм. Модели неравномерности толщины плёнки Δ [%] и скорости осаждения Q [$\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$] при $\beta = 10^\circ$ в зависимости от L и B представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

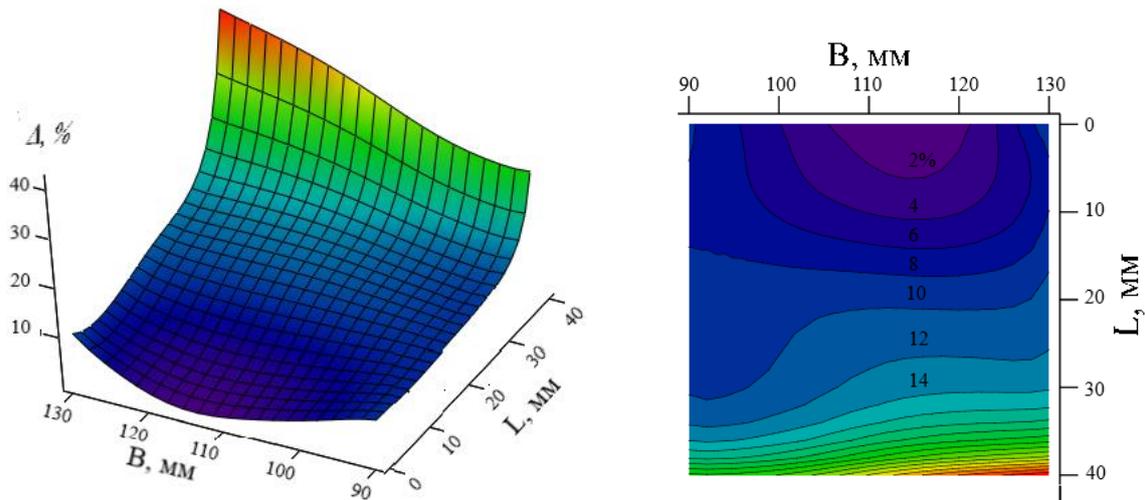


Рис. 4. Модель неравномерности толщины плёнки Δ [%] при угле наклона магнетрона $\beta = 10^\circ$ в зависимости от расстояния B от подложкодержателя и эксцентриситета L : а) график поверхности; б) линии уровня.

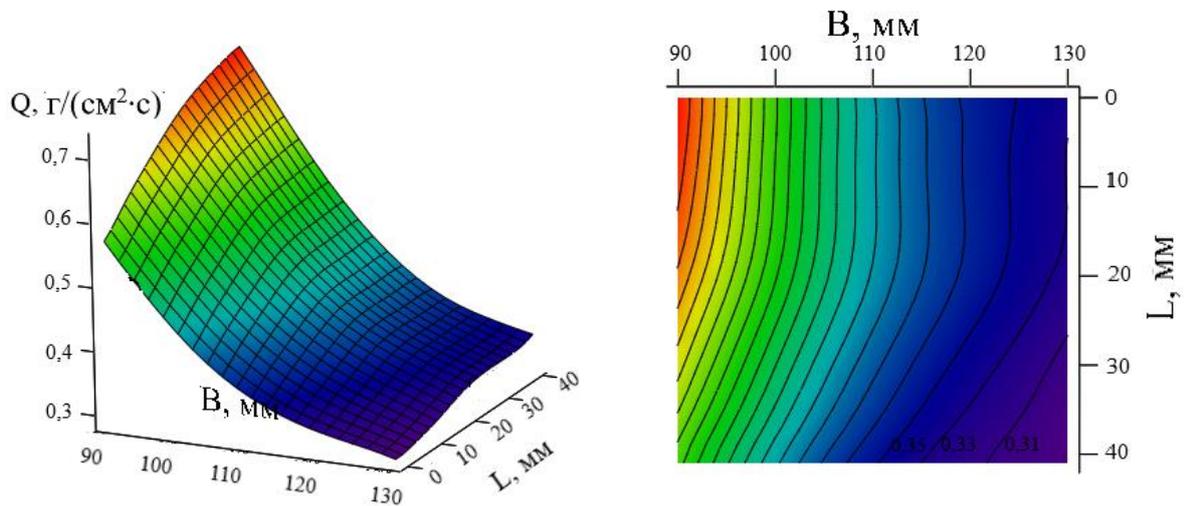


Рис. 5. Модель скорости осаждения Q [$\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$] при угле наклона магнетрона $\beta = 10^\circ$ в зависимости от расстояния B от подложкодержателя и эксцентриситета L : а) график поверхности; б) линии уровня.

Результаты моделирования неравномерности толщины двухкомпонентной плёнки

На основании проведенного в *Mathcad* моделирования неравномерности толщины и скорости осаждения плёнки выдвинуты следующие требования к расположению магнетронов относительно подложкодержателя, при которых обеспечивается неравномерность толщины плёнки менее 5%:

- угол наклона магнетрона $\beta > 10^\circ$;
- эксцентриситет $L < 5$ мм;
- расстояние $B = 105 \dots 130$ мм.

По результатам моделирования скорости осаждения плёнки при β в указанных диапазонах L и B наибольшая осаждения $0,496 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ обеспечивается при $L = 0$ мм и $B = 105$ мм.

На основании приведенных условий выбираются k и h (рис. 4):

$$h = B \cos \beta - L \sin \beta = 105 \cdot \cos(10^\circ) = 103,4 \approx 104 \text{ мм} \quad (1);$$

$$k = B \sin \beta + L \cos \beta = 105 \cdot \sin(10^\circ) = 18,2 \text{ мм} \approx 20 \text{ мм} \quad (2).$$

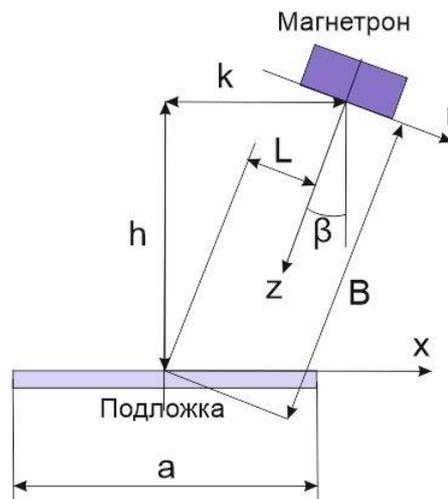


Рис. 6. Расчетная схема расположения магнетрона относительно подложки.

Таким образом, исходя из требований к неравномерности толщины менее 5%, высокой скорости осаждения плёнки и малом угле наклона выбраны расстояния от подложкодержателя до магнетрона $k = 20$ мм и $h = 104$ мм при угле $\beta = 10^\circ$, что удовлетворяет требуемым условиям обеспечения неравномерности толщины пленки менее 5%. Данная компоновка магнетронного узла может быть реализована на установке ВУП-11М для формирования двухкомпонентных тонких плёнок WSi для однофотонных детекторов.

Заключение

На основании проведенного моделирования неравномерности толщины плёнки WSi в зависимости от расположения магнетронов относительно подложкодержателя определено, что требуемая неравномерность толщины менее 5% плёнки $0,5 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ обеспечивается при $\beta = 10^\circ$, расстоянии $B = 105 \dots 120$ мм и эксцентриситете $L = 0 \dots 5$ мм. В выбранном диапазоне наибольшая скорость осаждения $0,496 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ достигается при $L = 0$ мм и $B = 105$ мм, что соответствует расстоянию между магнетронами $2k = 40$ мм, расстоянию между магнетронами и подложкодержателем $h = 104$ мм при угле между осями магнетрона и подложкодержателя $\beta = 10^\circ$. Данная компоновка магнетронного узла впоследствии может быть реализована на установке ВУП-11М для формирования двухкомпонентных тонких плёнок WSi для однофотонных детекторов.

Литература

1. Минаева, О. В., Окунев, О. В., & Чулкова, Г. М. (2013). Быстродействующий однофотонный детектор на основе тонкой сверхпроводниковой пленки NbN.
2. Смирнов, К.В. (2013). Особенности разогрева и релаксации горячих электронов в тонкопленочных сверхпроводниковых наноструктурах и 2D полупроводниковых гетероструктурах при поглощении излучения инфракрасного и терагерцового диапазонов (дис. на соиск. уч. ст. док. физ.-мат. наук, Москва).
3. Санджинетти, Б., Амри, Э., & Ричоу, Ф. (2017). Однофотонные детекторы для атмосферных оптических линий связи. *Фотоника*, (3), 56-69.
4. Kitaygorsky, J. (2008). Photon and dark counts in NbN superconducting single-photon detectors and nanostripes (Doctoral dissertation, New York).
5. Zhang, X. (2018). Characteristics of tungsten silicide and its application for single X-ray photon detection (Doctoral dissertation, University of Zurich).
6. Marsili, F., Verma, V. B., Stern, J. A., Harrington, S., Lita, A. E., Gerrits, T., ... & Nam, S. W. (2013). Detecting single infrared photons with 93% system efficiency. *Nature Photonics*, 7(3), 210.
7. Jin Jin, Fengfeng Fu, Xiaoqing Jia, Lin Kang, Zhihe Wang, Xuecou Tu, Labao Zhang 2019 *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 29, 5, 18483128.
8. Zhang, X., Engel, A., Wang, Q., Schilling, A., Semenov, A., Sidorova, M., ... & Siegel, M. (2016). Characteristics of superconducting tungsten silicide W_xSi_{1-x} for single photon detection. *Physical Review B*, 94(17), 174509.
9. Murphy, R., Grein, M., Gudmundsen, T., McCaughan, A., Najafi, F., Berggren, K. K., ... & Dauler, E. (2015, May). Saturated photon detection efficiency in NbN superconducting photon detectors. In *CLEO: QELS_Fundamental Science* (pp. FF2A-3). Optical Society of America.
10. Ren, X. (2015). Advanced photon counting techniques for long-range depth imaging (Doctoral dissertation, Heriot-Watt University).
11. Banerjee, A., Baker, L. J., Doye, A., Nord, M., Heath, R. M., Erotokritou, K., ... & Hadfield, R. H. (2017). Characterisation of amorphous molybdenum silicide (MoSi) superconducting thin films and nanowires. *Superconductor Science and Technology*, 30(8), 084010.
12. Vasilev D., Malevannaya E. and Moiseev K. 2017 *J. of Phys.: Conf.Ser.* 872, 012027.
13. Васильев Д.Д., Малеванная Е.И., Моисеев К.М. Распределение соотношения компонентов по подложке при нанесении ультратонких пленок WSi из двух источников методом магнетронного распыления // «Вакуумная наука и техника» Материалы XXII научно-технической конференции. Под редакцией академика А.С.Бугаева. М.:.2015 – С.18-22.
14. Sauerbrey, G. (1959). Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung. *Zeitschrift für physik*, 155(2), 206-222.
15. Seleznev V., Divochiy A., Vakhtomin Yu., Morozov P., Zolotov P., Vasil'ev D., Moiseev K., Malevannaya E. and Smirnov K. 2016 *J. of Phys.: Conf. Ser.* 737, 012032.