

## Разработка узла с двумя источниками магнетронного распыления для формирования ультратонких покрытий WSi для SNSPD

*И.В. Михайлова, В.А. Мамонтова, С. Хыдырова, М.Ю. Акишин, Д.Д. Васильев,  
К.М. Моисеев*

*Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1  
e-mail: ir.v.mikh@gmail.com, d.d.vasiliev@bmstu.ru, k.moiseev@bmstu.ru*

*В статье приведена конструкция узла, состоящего из двух источников магнетронного распыления, с возможностью регулирования угла наклона источников, разработанная специально для повышения равномерности ультратонких покрытий WSi. Сконструирован новый источник магнетронного распыления с косвенным охлаждением и мишенью диаметром 2". Представлены 3D модели конструкций.*

*Development of a unit with two magnetron sputtering sources for the formation of ultrathin WSi films for SNSPD. I.V.Mikhaylova, V.A.Mamontova, S.Hydyrova, M.Y.Akishin, D.D.Vasilev, K.M.Moiseev. The article describes the design of the assembly consisting of two magnetron sputtering sources, with the ability to control the angle of inclination of the sources, designed specifically to increase the uniformity of WSi ultrathin films. A new magnetron sputtering source with indirect cooling and a 2" target was designed. 3D models of constructions are presented.*

### Введение

В последние годы возрос интерес к классу оптоэлектрических приборов – однофотонных детекторов оптического излучения, позволяющих с высоким быстродействием регистрировать одиночные кванты света [1]. Квантовые оптические технологии, на которых основаны применения в квантовой криптографии, разработаны для работы на телекоммуникационных длинах волн, т.е. в ближнем ИК диапазоне (0,7...2,3 мкм). В 2001 году был разработан новый тип детекторов – сверхпроводниковый однофотонный детектор SNSPD (Superconducting Nanowire Single Photon Detector) [2]. SNSPD в сравнении с аналогичными типами однофотонных детекторов (фотоумножителями, лавинными фотодиодами) комплексно имеет лучшие параметры: спектральный диапазон от 0,7 до 2,3 мкм, низкий джиттер (менее 40 пс), низкий уровень темновых отсчетов (менее 10 Гц) и квантовая эффективность более 85% [1, 3].

Актуальным направлением исследования являются SNSPD на основе аморфных плёнок силицида вольфрама (WSi) благодаря возможности достичь эффективности детектирования, приближающейся к 100 % [4]. В статье [3] получен результат с квантовой эффективностью 93 %. Аморфная структура WSi подразумевает однородно разупорядоченный материал, который более устойчив к структурным дефектам, что позволяет изготавливать устройства большей площади. Кроме того, аморфная структура слабо зависит от материала подложки, что позволяет легче оптимизировать оптическую связь и поглощение детекторов [5]. В материалах с низкой критической температурой, как у WSi (~5 K), меньше энергетическая щель. В связи с малой энергетической щелью и разупорядоченной структурой WSi при поглощении фотона образуется горячее пятно большего размера, что обуславливает более высокую квантовую эффективность детекторов на основе плёнок WSi по сравнению с NbN [6].

Сформировать плёнку WSi можно несколькими методами: электронно-лучевым испарением, импульсным лазерным осаждением, магнетронным распылением [7]. Метод формирования плёнки WSi должен обеспечивать высокую равномерность толщины покрытия, возможность варьирования скорости осаждения компонентов для достижения требуемой структуры и стехиометрического состава плёнки. Данным требованиям соответствует магнетронное распыление из двух источников. Равномерность обеспечивается зоной эрозии мишени магнетрона, а скорость регулируется с помощью изменения напряжения или тока разряда.

В связи с малой толщиной формируемой плёнки (4...5 нм) необходимо строго соблюдать параметры процесса нанесения: стабильность режимов и время нанесения. Любое отклонение от рассчитанных значений времени или мощностей на источниках приводят к изменениям в толщине и стехиометрическом составе плёнки. Все это влияет на выходной параметр – критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$  [8]. Максимальная  $T_c$  для WSi составляет порядка 5 К. Такая температура достигается при определенном соотношении толщин компонентов: 25 % Si, 75 % W [7].

В научной группе лаборатории «Элионные процессы и нанотехнологии» разработана установка ВУП-11М для магнетронного распыления тонких плёнок WSi для SNSPD [9]. Распыление происходит из двух магнетронов, расположенных под углом  $90^\circ$  друг к другу. При нанесении двухкомпонентной плёнки WSi при таком расположении магнетронов среднее значение неравномерности распределения материала по толщине составляет порядка 8,5%, что может негативно сказываться на параметрах детектора из-за неоднородности сверхпроводящих свойств пленки по толщине. Предположительно, это связано с тем, что при нанесении двухкомпонентных плёнок из двух источников мишень Si «запыляется» материалом мишени W, так как скорость распыления W выше. Данное явление приводит к изменению стехиометрического состава компонентов плёнки в связи с распылением из мишени первого магнетрона, осажденного на нее материала мишени второго магнетрона [10]. Снижения неравномерности до 5% и менее можно добиться уменьшением угла между магнетронами для предотвращения «запыления» мишени, и обеспечением вращения подложки [11]. В настоящее время на установке ВУП-11М невозможно обеспечить данные требования, поскольку ввод вращения находится на верхнем фланце установки, и вращение подложки происходит только вокруг вертикальной оси камеры. В связи с этим решено модернизировать установку ВУП-11М для обеспечения требований уменьшения неравномерности.

Данная работа посвящена разработке узла с двумя источниками магнетронного распыления, обеспечивающего формирование тонких пленок WSi с наименьшей неравномерностью для их использования в SNSPD. Определены требования к разрабатываемой магнетронной системе, сконструирован новый источник магнетронного распыления и разработана компоновка узла, состоящего из двух источников магнетронного распыления с возможностью наклона источников, учитывающая геометрические размеры камеры и конфигурацию внутрикамерной оснастки установки ВУП-11М.

#### **Узел магнетронной распылительной системы**

Для уменьшения неравномерности при модернизации установки нужно обеспечить следующие требования: угол между магнетронами меньше  $90^\circ$ , возможность вращения подложки. Поскольку теоретический расчет расположения магнетронов для минимальной неравномерности может не совпасть с практикой, то желательно предусмотреть варьирование угла между магнетронами. В установке ВУП-11М предусмотрено вращение подложки вокруг центральной вертикальной оси камеры. Тогда магнетронную систему следует расположить в плоскости перпендикулярной оси вращения, то есть на нижнем фланце.

Варианты расположения магнетронов под углом: с помощью разрезанного колена, сварки прямых срезанных труб, гибкого сильфона. Поскольку стоит задача регулировать угол между магнетронами, то подходят варианты с разрезанным коленом и гибким сильфоном. В варианте с коленом сложности с заслонками магнетронов, так как привод заслонки должен сгибаться, и один торец колена придётся сваривать, а сварка в вакууме нежелательна. Вариант с гибким сильфоном является более простым в изготовлении и использовании, поэтому мы остановились на нём. Таким образом, регулирования угла происходит с помощью гибкого сильфона 1 (рис. 1) и направляющих планок 2, взаимное расположение которых регулируется болтовым соединением. Магнетрон соединяется с сильфоном с помощью стандартного хомута KF50. Наибольший угол наклона между магнетронами равен  $15^\circ$ , он ограничивается особенностями конструкции камеры. Камера имеет форму куба с гранью 330 мм с шестью фланцами ДУ320 на сторонах. Магнетронная система располагается на фланце DN250, присоединяемого к камере при помощи конического переходника на ДУ320, для увеличения расстояния между подложкой и мишенями.

Для крепления магнетронной системы к фланцу предназначен патрубок 4, соединяемый стандартным хомутом KF50 с сильфоном 1. Направляющие планки для регулирования угла закрепляются на специальных хомутах 5, установленных на сильфоне 1, с помощью винтового соединения. Для передачи вращения под углом на вал 6, соединяемый с заслонкой 7, используется карданный шарнир.

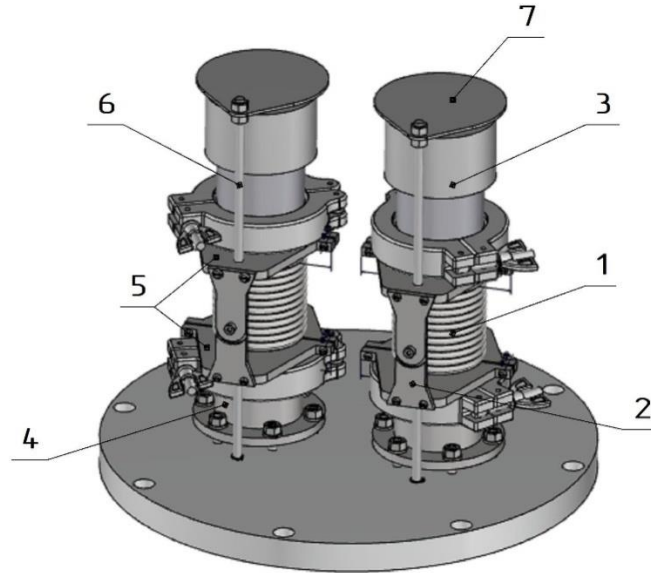


Рис. 1. 3D модель магнетронной системы.

1 – гибкий сильфон; 2 – направляющие планки; 3 – магнетрон; 4 – патрубок; 5 – специальные хомуты для крепления планок; 6 – вал; 7 – заслонка.

Моделирование неравномерности для разработанной магнетронной системы показало, что неравномерность толщины пленки по подложке при вращении подложки и угле между магнетронами более  $10^\circ$  составляет менее 5%.

### Источник магнетронного распыления

Процесс распыления зависит от рабочего давления, электрического поля и магнитного поля, которое определяется параметрами магнитов 3 и 4 (рис. 2). Учитывая габариты камеры, на одном фланце можно разместить с наклоном два магнетрона, имеющих диаметр мишеней магнетронов до 2". При таком диаметре мишени для равномерности магнитного поля нужно использовать кольцевой и цилиндрический магниты. Выбран неодимовый кольцевой магнит 4 размерами  $\text{Ø}51 \times \text{Ø}52 \times 12$  мм, и неодимовый цилиндрический магнит 3 размером  $\text{Ø}12 \times 13$  мм. Для выравнивания магнитного поля под магнитами располагается магнитопровод 7 из магнитного материала.

Магниты располагаются в крышке 5. На крышку устанавливается мишень 1 и базируется прижимным кольцом 6 с помощью шести установочных винтов М4. В процессе магнетронного распыления только 3% энергии идет на полезный процесс, а остальное – на тепловой нагрев мишени [12], что может привести к нагреву магнитов выше точки Кюри. Для предотвращения размагничивания магнитов, в крышке предусмотрены каналы, в которые непрерывно подаётся вода для охлаждения магнитов. В нижней части крышки имеются резьбовые отверстия для крепления к ней основания 8. При этом в каждое резьбовое отверстие крышки, как для крепления прижимного кольца 6, так и для крепления основания 8, входят боковые отверстия для выхода запертого воздуха. Крышка имеет 3 канавки для уплотнений.

Базовой деталью магнетрона является основание 8, конструкция которого обеспечивает охлаждение магнетрона, сжатие всех уплотнений и подачу потенциала. В корпусе имеется канавка для установки стопорного кольца, на которое устанавливается прижимающее кольцо 10. При вкручивании болтов М5 в кольцо 10 все детали магнетрона прижимаются друг к другу, тем самым сжимая уплотнения 11 и обеспечивая вакуумную герметичность. Также в кольце 10

предусмотрено резьбовое отверстие М3 для крепления контакта от блока питания с потенциалом до 1000 В. Для того, чтобы не произошло короткого замыкания между катодом и заземленным анодом, на катод устанавливают два изолятора 13 и 14, которые имеют уступы для вхождения друг в друга при сборке конструкции.

Элементы, расположенные снаружи основания 8, находятся внутри корпуса 12. Корпус имеет фланец KF50, с помощью которого магнетрон крепится к остальной конструкции. На корпус крепится анод 2, который может выдвигаться на расстояние до 30 миллиметров. Это необходимо для фокусировки потока распыления и предотвращения «запыления» элементов вокруг мишени, в том числе подвижных механических элементов.

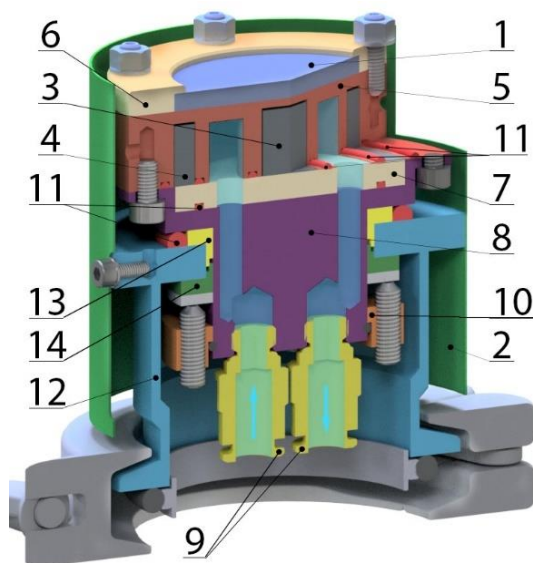


Рис. 2. Магнетрон в разрезе.

- 1 – мишень; 2 – анод; 3 – цилиндрический магнит; 4 – кольцевой магнит;  
5 – крышка; 6 – прижимное кольцо; 7 – магнитопровод; 8 – основание;  
9 – фитинг; 10 – кольцо; 11 – уплотнение; 12 – корпус внешний; 13 – изолятор;  
14 – изолятор внешний.

### Результаты

Разработан узел с двумя источниками магнетронного распыления, расположенными на одном фланце DN250, с возможностью регулирования угла между магнетронами от 0 до 15°. Для данной магнетронной системы разработана конструкция источника магнетронного распыления с косвенным охлаждением, с возможностью установки мишени диаметром 2", изменяемым положением анода и установочным фланцем KF50.

По результатам моделирования разработанная конструкция магнетронной системы обеспечивает неравномерность толщины по подложке менее 5% при угле между магнетронами более 10°.

### Заключение

Уменьшить неравномерность соотношения материалов по толщине ультратонкой плёнки WSi можно с помощью предотвращения запыления мишеней друг другом, а неравномерность толщины по подложке обеспечением вращения подложки. В связи с этим при модернизации установки ВУП-11М новая магнетронная система располагается на нижнем фланце камеры для распыления WSi на вращающуюся подложку и имеет регулируемый угол между магнетронами от 0 до 15°, что обеспечивает неравномерность толщины по подложке менее 5%, а наличие цилиндрического анода позволяет исключить запыление мишеней магнетронов друг друга, что обеспечивает неравномерность соотношения материалов по толщине пленки, близкой к 0%.

Литература

1. О.В.Минаева, О.В. Окунев, Г.М. Чулкова, А.А. Корнеев, К.В. Смирнов, Б.М. Воронов, Ю.Б. Вахтомин, А.В. Дивочий, М.А. Тархов, Н.С. Каурова, В.А. Селезнев, И.И. Милостная, Г.Н. Гольцман. Быстродействующий однофотонный детектор на основе тонкой сверхпроводниковой пленки NbN: монография: научное издание // М.: Прометей, 2013– С. 144.
2. 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.
3. Marsili, F., Verma V., Stern J., Harrington S., Lita A., Gerrits T. and Nam S. 2013*Nat. Photon.***7**, 210.
4. Zhang X., Engel A., Wang Q., Schilling A., Semenov A., Sidorova M., Hubers H., Charaev I., Ilin K. and Siegel M. 2016*Phys. Rev.* **94**, 174509.
5. Панфилов Ю.В. Конспект лекций по курсу «Элионные процессы и нанотехнологии»: Библиотека Наноинженерии. – М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2008 – С. 40.
6. Murphy R., Grein M., Gudmundsen T., McCaughan A., Najafi F., Berggren K., Marsili F., Dauler E. 2015 *CLEO: QELS\_Fundam. Sci.*
7. Kondo S. 1992 *J. of mater. res.***7**, 853.
8. 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.
9. Vasilev D., Malevannaya E. and Moiseev K. 2017 *J. of Phys.: Conf.Ser.***872**, 012027.
10. Д.Д. Васильев, Е.И. Малеванная, К.М. Моисеев. Исследование скорости осаждения ультратонких сверхпроводящих пленок WSi при варьировании энергии частиц осаждаемого материала // «Вакуумная наука и техника» Материалы XXV научно-технической конференции. М.: НОВЕЛЛА. 2018 – С.221-227.
11. 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.
12. Krutenat R., Jesick W. 1970*J. Vac. Sci. Techn.*, **7**, S40.