

Научная статья
УДК 620.3+533.59+621.793
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/3-14>

Автоматизация процесса легирования силицидосодержащих образцов

Дмитрий Владимирович Фомин, Илья Александрович Рябов✉
Илья Олегович Шолыгин, Алексей Вячеславович Поляков

Амурский государственный университет,
Благовещенск, Российская Федерация
✉ rybovilay@gmail.com

Аннотация. В работе представлен результат автоматизации процесса легирования силицидосодержащих образцов на основе разработанного прототипа устройства, которое позволяет осуществлять ступенчатое легирование, а также выполнять точное позиционирование масок относительно образца и их смену в зависимости от скорости сублимации легирующей добавки из резистивного испарителя. Разработка прототипа проведена исходя из модернизации ранее изготовленного лабораторного образца устройства (заявка Роспатент № 2024135444 от 27.11.2024). К элементам модернизации относятся: изменение геометрии и расположения резистивного испарителя, а также способ передачи вращения от ведущего вала к валу каретки с масками.

Ключевые слова: вакуумные системы, полупроводники, резистивный испаритель, легирование, прецизионные маски

Для цитирования: Фомин Д.В., Рябов И.А., Шолыгин И.О., Поляков А.В. Автоматизация процесса легирования силицидосодержащих образцов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 3–17.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта АмГУ на 2024–2025 год.

Original article

Automation of the doping process of silicide-containing samples

Dmitry V. Fomin, Ilya A. Ryabov✉, Ilya O. Sholygin, Alexey V. Polyakov

Amur State University,
Blagoveshchensk, Russian Federation
✉ rybovilay@gmail.com

Abstract. The paper presents the result of automating the process of alloying silicide-containing samples based on a developed prototype device that allows for stepwise alloying, as well as performing precise positioning of masks relative to the sample and changing them depending on the rate of sublimation of the alloying additive from a resistive evaporator. The prototype was developed based on the modernization of a previously manufactured laboratory sample of the device (Rospatent application No. 2024135444 dated 11.27.2024). The modernization elements include: changing the geometry and location of the resistive evaporator, as well as the method of transferring rotation from the drive shaft to the shaft of the carriage with masks.

Keywords: vacuum systems, semiconductors, resistive evaporator, alloying, precision masks

For citation: Fomin D.V., Ryabov I.A., Sholygin I.O., Polyakov A.V. Automation of the doping process of silicide-containing samples. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 3–14. (In Russ.).

Foundation: AmSU internal grant for 2024–2025.

Введение

Технологии производства полупроводниковых приборов базируются на процессах фотолитографии, травлении, диффузии, напылении тонких плёнок. Во многих из них часто используется маскирование. Так, в фотолитографии используют фотошаблоны при экспонировании фоторезиста, для получения определённой топологии рельефа фоторезиста на полупроводнике. Маскирование может также использоваться при формировании на полупроводниковых приборах тонких плёнок, контактных площадок, резистивных или диэлектрических слоёв, что позволяет получить планарные транзисторы, тонкоплёночные резисторы, конденсаторы и др. [1–5].

В процессе формирования полупроводниковых приборов важную роль играет также легирование полупроводников, то есть добавление в состав материала легирующих примесей. Это делается для изменения типа носителей заряда и концентрации их в полупроводнике, а также для создания плавного p-n перехода. Существует два основных метода осуществления легирования: ионная имплантация и термодиффузия [3–26].

Ионная имплантация, или ионное легирование, заключается во внедрении легирующей примеси бомбардировкой примесных атомов, представляющих собой ионы с энергиями порядка десятков кэВ. Глубина их проникновения составляет до одного микрона. Возможен процесс разрушения структуры кристалла при данных энергиях ионов, однако процесс является обратимым, для этого проводится термический отжиг. Одними из важнейших преимуществ такого метода являются точный контроль над количеством осаждаемой примеси, а также возможность точного нанесения на определённую область полупроводника. А недостатком является высокая стоимость оборудования для реализации данного метода [6, 7, 9–15].

Метод термодиффузионного легирования основан на попадании в полупроводник легирующей примеси в результате диффузии её из газовой фазы [1, 3–5, 16–26]. На поверхности атомы примеси взаимодействуют с атомами полупроводника и диффундируют в приповерхностные слои, образуя твёрдый раствор замещения. Процесс возможен при наличии в полупроводнике точечных дефектов, а именно вакансий. Во многом процесс зависит от температуры полупроводника: чем выше температура, тем выше коэффициент диффузии, вследствие этого растёт частота диффузионных перескоков атомов. Для предотвращения диффузии окружающей атмосферы процесс диффузии проводят под вакуумом. В данном методе используются маски для осуществления легирования определённой области полупроводника или создание ступенчатого профиля легирования (создание градиента концентрации легирующей примеси). Важную роль при использовании маскирования занимает расстояние от полупроводника до масок для более чётких границ области осаждаемой примеси. Основным преимуществом, по сравнению с ранее рассмотренным методом ионной имплантации, является невысокая стоимость оборудования. Недостаток – низкий контроль концентрации напыляемой примеси [6–8].

Анализируя литературные источники [27, 28], можно выделить следующие типы масок:

- 1) маски, представляющие собой слой нанесённого на полупроводник органического или неорганического материала с участками для легирования на этом слое;
- 2) маски, жёстко закреплённые на полупроводнике с отверстиями, выполняющими роль окон для напыления.

Такие варианты масок позволяют наносить точный топографический рисунок. Однако не позволяют создавать сложную топологию, такую как ступенчатую, или градиентную. Для её реализации необходимо совершать замену этих масок в вакууме.

Обзор технических реализаций устройств, позволяющих совершать перемещение, был проведён на основе данных из Роспатента. Так, в источнике [2] описан механизм перемещения образцов в вакуумной камере, осуществляемого ручным приводом, который не позволяет осуществлять точное и своевременное позиционирование. В [29] перемещение осуществляется с помощью шагового двигателя, но в отличие от предыдущего оно происходит в условиях атмосферы. Так, в результате проведённого патентного поиска не было найдено устройств, ана-

логичных предлагаемому в настоящей статье, которые позволяли бы производить смену масок в условиях вакуума.

На основе вышеизложенного были выделены следующие требования к установке для автоматизации процесса легирования силицидосодержащих образцов:

- 1) точное позиционирование масок относительно образца;
- 2) своевременная смена масок в зависимости от скорости испарения осаждаемого материала.

Материалы и методы

Основная задача предлагаемого устройства заключается в перемещении масок в условиях вакуума и осуществлении контроля процесса осаждения различных примесных материалов, например Al, Au, Sb, для нанесения контактов на полупроводниковые материалы на основе силицидов. Осаждение предлагается проводить хорошо зарекомендовавшим себя методом термодиффузии. Реализовать данный метод возможно в том числе с помощью устройства, представленного на рисунке 1.

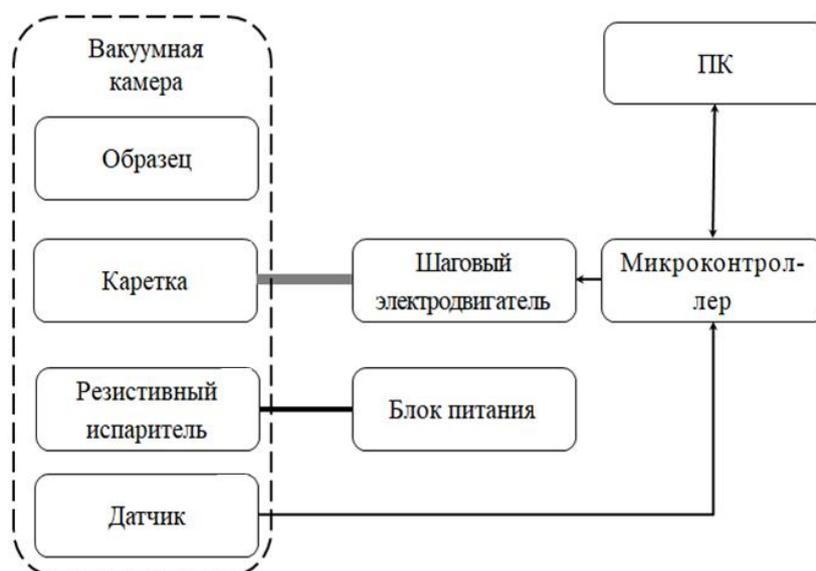


Рис. 1. Структурная схема устройства для реализации метода термодиффузии со сменой прецизионных масок (из заявки Роспатент № 2024135444 от 27.11.2024)

Fig. 1. Structural scheme of the device for the implementation of the thermal diffusion method with a change of precision masks (from Rospatent application No. 2024135444 dated 11.27.2024)

Устройство работает следующим образом: на персональном компьютере (ПК) пользователем устройства задаётся очередность смены масок и требуемая концентрация напыляемого вещества. Блоком питания осуществляется нагрев резистивного испарителя. Под действием температуры и внешнего давления вакуума твёрдое вещество переходит в жидкую, а затем в газовую фазу или же переходит непосредственно напрямую в газовую фазу. Тепловая энергия придаёт ускорение атомам, вследствие чего те перемещаются из резистивного испарителя в сторону образца и датчика. Попадая на образец, атомы диффундируют в кристаллическую решётку образца. Скорость сублимации регистрируется датчиком, информация от которого передаётся в микроконтроллер. Благодаря программному обеспечению микроконтроллер анализирует полученную информацию и определяет параметры: время экспозиции маски перед образцом и скорость перемещения масок. После чего микроконтроллер подаёт сигнал шаговому двигателю на осуществление перемещения каретки с масками. В случае нестабильности скорости сублимации микроконтроллер посредством программы изменяет параметры

согласно заданию пользователя. По завершении программы процесс легирования образца считается законченным. В случае ошибок, возникших в процессе легирования, на персональный компьютер пользователю приходит уведомление об их наличии.

В предложенном устройстве маски являются легкозаменяемыми, так как выполнены в виде кассеты, помещающейся в держатель. Конфигурация отверстий на масках может быть различна, например, маски, выполненные с постепенным увеличением их ширины, позволяют создавать ступенчатое (градиентное) легирование на образце.

В первом прототипе устройства предлагалось использовать параллельное расположение резистивного испарителя относительно масок и, соответственно, самого силицидосодержащего образца. Также ведущий вал был расположен соосно с валом каретки и соединён с ним муфтой. 3D-модель первоначального вида устройства представлена на рисунке 2.

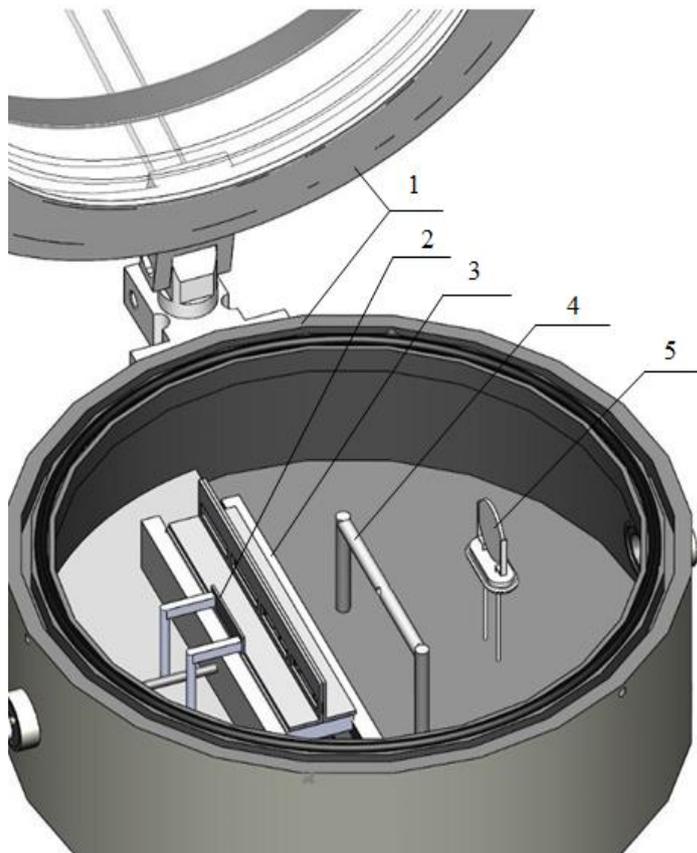


Рис. 2. 3D-модель вакуумной камеры в открытом виде:

**1 – вакуумная камера (основание с колпаком); 2 – силицидосодержащий образец;
3 – каретка с закреплёнными на ней масками; 4 – резистивный испаритель; 5 – датчик**

Fig. 2. 3D-model of the vacuum chamber in open form:

1 – vacuum chamber (base with hood); 2 – silicide-containing sample;
3 – carriage with masks fixed on it; 4 – resistive evaporator; 5 – sensor

Результат модернизации

Для реализации прототипа устройства были использованы вакуумная камера вакуумного универсального поста (ВУП-5), танталовая трубка в качестве резистивного испарителя, подвижная каретка с масками, силицидосодержащий образец, закреплённый в держатель. В качестве привода был использован шаговый двигатель.

В данной камере был проведён эксперимент по осаждению материала (Mg) на образец через маску. В качестве термоисточника использовалась танталовая трубка, концы которой были соединены с токовводами, в середине трубки было проделано отверстие для выхода испаряемого материала. Образец представлял собой пластину кремния. Откачным вакуумным

постом установлено давление 10-3 Па. Постоянным током осуществлялся нагрев танталовой трубки, происходило испарение материала из неё. В ходе эксперимента было установлено, что при указанном давлении толщина плёнки, формируемой на подложке, меньше, чем при аналогичных условиях её формирования в сверхвысоковакуумной камере с давлением 10-6 Па. Из чего сделано было заключение, что при давлении 10-3 Па велико рассеивание атомов испаряемого вещества за пределы подложки. Для создания направленного пучка было предложено расположить трубочку резистивного испарителя перпендикулярно относительно образца (развернув на 90° в сравнении с первым вариантом) (рис. 3). Концы трубки были открытыми, причём один из них направлен на датчик, другой – на образец, других отверстий в трубке нет. Материал должен быть плотно упакован в центре трубки. Токовводы присоединяются слева и справа от её центра на некотором расстоянии. В ходе многократного отражения атомов материала об стенки трубки испарителя создаётся направленный пучок атомов.

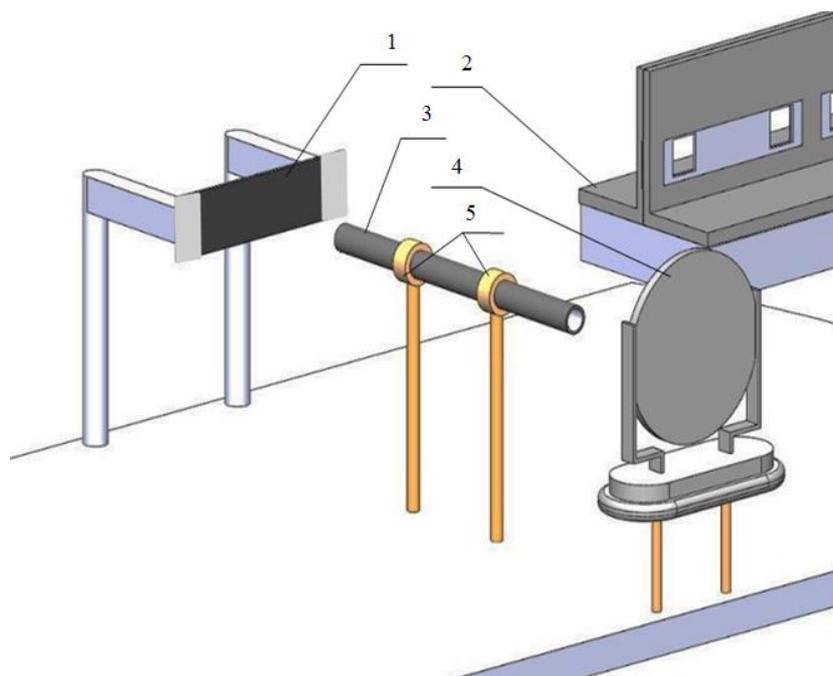


Рис. 3. 3D-вид системы осаждения из резистивного источника на образец с контролем толщины плёнки по датчику:

1 – силицидосодержащий образец; 2 – каретка с закреплёнными на ней масками; 3 – резистивный испаритель; 4 – датчик; 5 – токовводы

Fig. 3. 3D-view of the deposition system from a resistive source onto a sample with sensor-controlled film thickness:

1 – a silicide-containing sample; 2 – a carriage with masks fixed on it;
3 – a resistive evaporator; 4 – a sensor; 5 – current leads

Для нанесения металлических контактов на полупроводник наиболее часто используются золото, сурьма и алюминий. Из данных, приведённых в [30], была построена зависимость равновесного давления паров данных металлов от температуры (рис. 4). Как упоминалось ранее, давление, создаваемое в камере, составляет 10^{-3} Па. При данном давлении термоисточник необходимо нагревать до температур порядка 1300 К (в случае золота, для остальных металлов ниже), температура плавления тантала, из которого изготовлен термоисточник, составляет 3290 К, что гарантирует возможность осуществления напыления золота, сурьмы или алюминия из данного резистивного источника при данном давлении.

В используемой вакуумной камере на основе ВУП-5 не предоставляется возможным реализовать соосное расположение ведущего вала и вала каретки, ввиду наличия выступающих из основания камеры токовводов. Входящие в состав образец, каретка, источник и датчик были подняты относительно основания камеры на высоту, превышающую высоту токо-вводов

Вследствие этого возникла новая задача по осуществлению передачи движения от ведущего вала к каретке. Для её решения было предложено использование шатунного механизма. Другие варианты реализации передачи движения, например с использованием ременной или цепной передачи, неизбежно привели бы к ухудшению давления камеры за счёт газящих материалов, входящих в состав этих механизмов передачи.

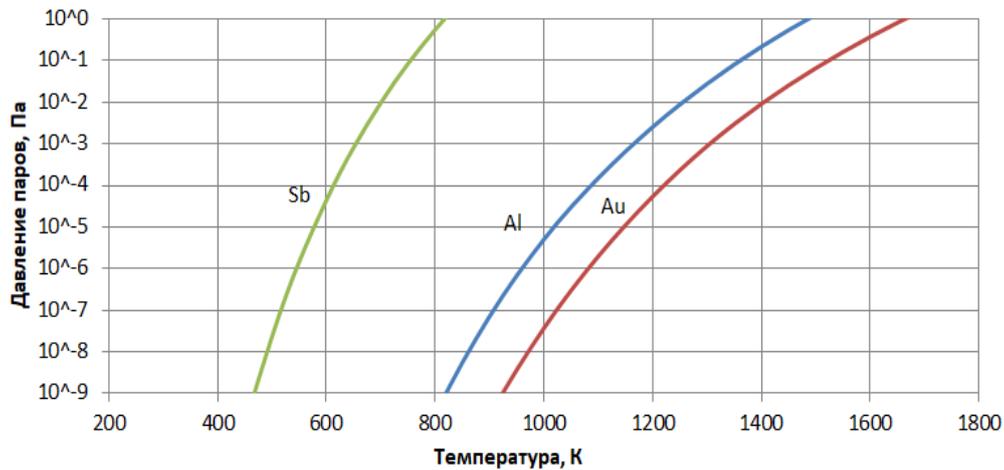


Рис. 4. Зависимость давления паров некоторых металлов от температуры

Fig. 4. Dependence of vapor pressure of some metals on temperature

Предложенный шатунный механизм (рис. 5) включает в себя два диска, сухие подшипники и шатун. Первый диск располагается на ведущем валу, проходящем через основание вакуумной камеры и систему вакуумизации, а второй диск – на валу, расположенном в основании каретки и отвечающем за преобразование вращательного движения в линейное поступательное. В каждом диске для соединения его посредством шатуна имеется отверстие, внутрь которого запрессовывается подшипник, в который в свою очередь запрессовывается один из концов шатуна.

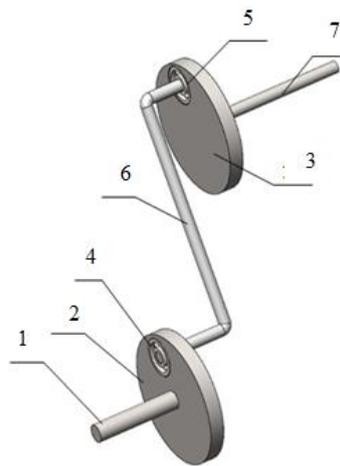


Рис. 5. 3D-модель шатунного механизма:

1 – ведущий вал; 2, 3 – диски; 4, 5 – сухие подшипники; 6 – шатун; 7 – вал каретки

Fig. 5. 3D-model of the connecting rod mechanism: 1 – drive shaft; 2, 3 – discs; 4, 5 – dry bearings; 6 – connecting rod; 7 – carriage shaft

В модернизированном устройстве (рис. 6) шаговый двигатель посредством ременной передачи (включающей в себя зубчатый ремень и два зубчатых шкива) передаёт вращение ведущему валу. Через шатунный механизм от ведущего вала передаётся вращательное движение валу, расположенному в основании каретки. Данный вал преобразует вращательное дви-

жение в линейное благодаря закреплённому на нём зубчатому колесу, двигающему плоскую рейку каретки. Тем самым путём преобразования вращательного движения в линейное возможно осуществление точного позиционирования масок на каретке относительно образца в горизонтальной плоскости. Датчик скорости сублимации легирующей примеси и образец при этом располагаются на одном расстоянии от центра испарителя для соблюдения условия по формированию одинакового количества испаряемого вещества в один момент времени на датчике и образце. При этом для получения более чёткого рельефа осаждаемого вещества образец располагается вплотную к маскам.

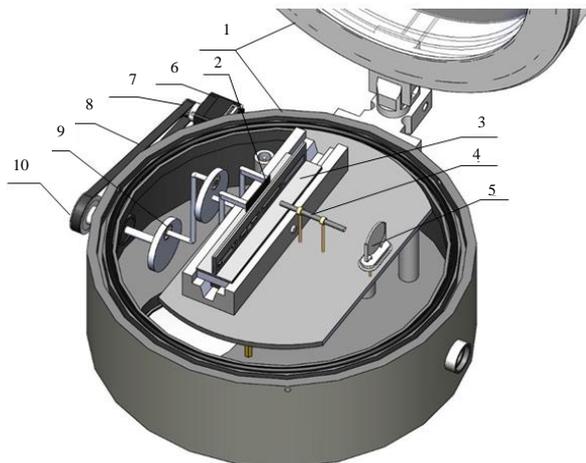


Рис. 6. 3D-модель реализуемого прототипа устройства смены масок:
1 – вакуумная камера (основание с колпаком); 2 – образец; 3 – каретка с закреплёнными на ней масками; 4 – термоисточник; 5 – датчик; 6 – шаговый двигатель;
7, 10 – зубчатые шкивы; 8 – ремень; 9 – шатунный механизм

Fig. 6. 3D-model of the implemented prototype of the mask changer:
 1 – vacuum chamber (base with hood); 2 – sample; 3 – carriage with masks fixed on it;
 4 – thermal source; 5 – sensor; 6 – stepper motor; 7, 10 – toothed pulleys; 8 – belt;
 9 – connecting rod mechanism

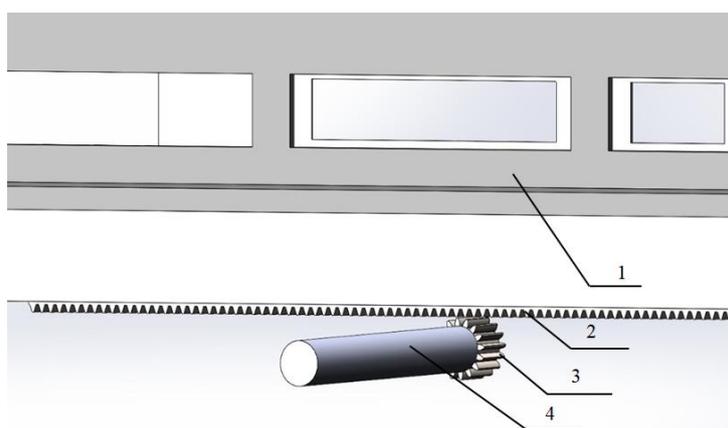


Рис. 7. Модель принципа преобразования вращательного движения от вала в линейное поступательное рейки:
1 – каретка с закреплёнными на ней масками; 2 – зубчатая рейка;
3 – зубчатое колесо; 4 – вал каретки

Fig. 7. Model of the principle of converting rotational motion from a shaft into a linear rotational rack:
 1 – carriage with masks fixed on it; 2 – gear rack; 3 – gear wheel; 4 – carriage shaft

Было определено минимальное перемещение каретки. Оно зависит от минимального угла поворота шагового двигателя ($1,8^\circ$ для наиболее распространённых моделей). Вращение на указанный угол вала двигателя передаётся расположенному на нём зубчатому шкиву с 20

зубьями и через ременную передачу далее передаётся шкиву с 40 зубьями, расположенному на ведущем валу, в результате чего последний поворачивается на $0,9^\circ$. Это приводит к вращению зубчатого колеса с диаметром делительной окружности 11,82 мм, расположенного на валу в основании каретки (рис. 7). А далее осуществляется преобразование вращательного движения в линейное поступательное, которое заставляет перемещаться зубчатую рейку на 0,19 мм в горизонтальной плоскости. Это позволяет установить минимальное прецизионное линейное перемещение маски относительно образца.

Заключение

Таким образом, в ходе разработки и модернизации прототипа устройства, предназначенного для автоматизации процесса легирования силицидосодержащих образцов, было достигнуто:

1) точное позиционирование масок относительно образца за счёт изменения способа передачи движения от ведущего вала к валу каретки. Добавлен шатунный механизм для передачи движения на высоту выше высоты тоководов, расположенных в камере. Минимальное перемещение каретки при угле поворота двигателя $1,8^\circ$ составило 0,19 мм;

2) своевременная смена масок в зависимости от скорости испарения осаждаемого материала за счёт использования датчика скорости, подключённого к микроконтроллеру. Изменена геометрия и ориентация на 90° резистивного испарителя относительно образца и датчика для получения направленного пучка атомов осаждаемого вещества.

Разработанный и модернизированный прототип позволяет осуществлять перемещение масок с высокой точностью и реализовать направленный процесс напыления примеси на образец в условиях высокого вакуума. Данное устройство можно использовать для создания полупроводниковых приборных структур с заданными свойствами на основе силицидосодержащих образцов.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Д.В. Фомин – разработка концепции и дизайна устройства; И.А. Рябов – создание 3D-моделей и подготовка текста; А.В. Поляков – редактирование текста; И.О. Шолыгин – сбор литературных данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

D.V. Fomin – development of the concept and design of the device; I.A. Ryabov – creation of 3D-models and text preparation; A.V. Polyakov – text editing; I.O. Sholygin – collection of literary data. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дубов В.Л., Фомин Д.В., Галкин Н.Г. Твёрдофазный рост и структура плёнок дисилицида бария на Si(111) // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (Национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 114–121. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-2-114-121>
2. Патент 2709280 С1 Российская Федерация, МПК В25J 21/00. Манипулятор, работающий в герметизированном объёме / А.А. Никитин: № 2019111550 : заявл. 16.04.2019 : опубл. 17.12.2019. EDN: VYXLRU
3. Brinkevich D., Volobuev V., Lukashevich M.G. [et al.]. Structure and electron-transport properties of photoresist implanted by Sb+Ions // Acta Physica Polonica A. 2011. Vol. 120, № 1. P. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.46>
4. Galkin N.G., Goroshko D.L., Dubov V.L., Fomin D.V., Galkin K.N., Chusovitina E.A., Chusovitina S.V. SPE grown BaSi₂ on Si(111) substrates: Optical and photoelectric properties of films and diode heterostructures on their base // Japanese Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 59. № SF. Art. SFFA11. DOI: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab6b76>

5. Galkin N.G., Fomin D.V., Dubov V.L., Galkin K.N., Pyachin S.A., Burkov A.A. Comparison of crystal and phonon structures for polycrystalline BaSi₂ Films grown by SPE method on Si(111) substrate // Defect and Diffusion Forum. 2018. № 386. P. 48–54. EDN: VHAZUA
6. Кесарев А.Г., Кондратьев В.В., Ломаев И.Л. К теории атомной диффузии после ионной имплантации // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119, № 11. С. 1160–1165.
7. Ремнев Г.Е., Тарбоков В.А., Павлов С.К. Модифицирование материалов при воздействии мощных ионных пучков // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 2. С. 5–26. DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2021-2-5-26>
8. Козлов А.Г., Кривоzubов О.В., Удод А.Н. Тонкие плёнки твёрдого протонпроводящего электролита на основе оксидов бария и церия // Вестник Омского университета. 2013. № 2(68). С. 70–74. EDN: RRQMRP
9. Krioni N.K., Mingazheva A.A., Mingazhev A.D. Increasing the wear resistance of machine parts made of aluminum alloys by ion nitriding with high-energy activation // Journal of Friction and Wear. 2024. Vol. 45, № 1. P. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366624700077>
10. Uglov V.V., Cherenda N.N., Khodasevich V.V. [et al.]. Formation of complex Al-N-C layer in aluminium by successive carbon and nitrogen implantation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1999. Vol. 147, № 1-4. P. 332–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00592-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00592-8)
11. Komarov F.F., Mil'chanin O.V., Parchomenko I.N. [et al.]. Influence of the laser pulse annealing of the silicon implanted with indium and arsenic ions on its optical and structural properties // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2024. Vol. 97, № 3. P. 745–752. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02946-7>
12. Romanov I., Parkhomenko I., Vlasukova L. [et al.]. Fluence effect on photo- and electroluminescence of silica layers implanted with Sn⁺ ions // Materials Letters. 2022. Vol. 308. Art. 131070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131070>
13. Filintoglou K., Pinakidou F., Arvanitidis J. [et al.]. Size control of GaN nanocrystals formed by ion implantation in thermally grown silicon dioxide // Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127, № 3. Art. 034302. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5132604>
14. Kharchenko A.A., Lukashevich M.G., Odzhaev V.B. [et al.]. Correlation of electronic and magnetic properties of thin polymer layers with cobalt nanoparticles // Particle and Particle Systems Characterization. 2013. Vol. 30, № 2. P. 180–184. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201200042>
15. Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Y.E. [et al.]. Structure and electrical properties of Con(CoO)₁₀₀ – n thin-film composites // Technical Physics. 2024. Vol. 69, № 6. P. 1813–1822. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784224060458>
16. Galkin K.N., Kropachev O.V., Maslov A.M. [et al.]. Electronic structure and optical properties of Ca₂Si films grown on silicon different oriented substrates and calculated from first principles // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, № S3.1. P. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.102>
17. Galkin N.G., Galkin K.N., Kropachev O.V. [et al.]. Formation, structure, and optical properties of singlephase CaSi and CaSi₂ films on Si substrates // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, № S3.1. P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.101>
18. Galkin N.G., Galkin K.N., Dotsenko S.A. [et al.]. Ca₂Si(100) epitaxial films on the Si(111) substrate: Template growth, structural and optical properties // Materials Science in Semiconductor Processing. 2020. Vol. 113. Art. 105036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105036>
19. Chusovitin E., Dotsenko S., Chusovitina S. [et al.]. Formation of a thin continuous GaSb film on Si(001) by solid phase epitaxy // Nanomaterials. 2018. Vol. 8, № 12. Art. 987. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano8120987>
20. Chernev I.M., Shevlyagin A.V., Galkin K.N. [et al.]. On the way to enhance the optical absorption of a-Si in NIR by embedding Mg₂Si thin film // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 109, № 4. Art. 043902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4960011>
21. Galkin N.G., Galkin K.N., Chernev I.M. [et al.]. Effect of sacrificial Mg₂Si layers and kinetic parameters on the growth, structure, and optical properties of thin Ca₂Si films on silicon substrates // Semiconductors. 2022. Vol. 56, № 7-12. P. 367–381. <https://doi.org/10.1134/s1063782622090019>
22. Jin Y., Fang H., Chen R. [et al.]. Graded distribution and refinement of Mg₂Si in Al–Mg₂Si alloy prepared by traveling magnetic field // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Vol. 24. P. 2319–2331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.152>

23. Jeon Ju., Lee S.H., Kim S.D. [et al.]. Ultrasound alters the nucleation pathway of primary Mg₂Si in a chemically modified multicomponent Al–Mg₂Si alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 1009. Art. 177001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177001>
24. Chernev I.M., Gouralnik A.S., Subbotin E.Yu. [et al.]. FeSi and CrSi₂ thin films as transparent conductive layers for VIS/SWIR sensitive Mg₂Si films grown on Si // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023. Vol. 87, № S3. P. 370–374. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1062873823705718>
25. Siminel N., Galkin K.N., Arushanov E., Galkin N.G. Photoconductivity study of Ca₂Si epitaxial film on Si(111) substrate // *Vacuum*. 2022. Vol. 203. Art. 111302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111302>
26. Myagkov V.G., Bykova L.E., Zhigalov V.S. [et al.]. Solid-state synthesis, magnetic and structural properties of epitaxial D03-Fe₃Rh(001) thin films // *Intermetallics*. 2023. Vol. 157. Art. 107871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107871>
27. Патент 140712 U1 Российская Федерация, МПК H01L 21/265. Маска для ионного легирования в пластины карбида кремния / В.В. Афанаскин, Н.А. Брюхно, М.С. Воронцов [и др.]; ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ»: № 2013150369/28 : заявл. 12.11.2013 : опубл. 20.05.2014. EDN: АУКSGG
28. Патент 2789662 C1 Российская Федерация, МПК H01L 21/02. Способ нанесения через жёсткую маску металлического рисунка на область с другим ранее нанесённым металлическим рисунком при производстве крышек корпусов неохлаждаемых термочувствительных элементов / К.А. Курыгин, И.М. Москаленко, А.А. Абакаров; ООО «Маппер»: № 2022118682: заявл. 08.07.2022 : опубл. 07.02.2023. EDN: ЕКЕАЮ
29. Патент 80048 U1 Российская Федерация, МПК G07F 11/16. Устройство перемещения товара в торговом автомате / Д.В. Щербаков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Комтоп» : № 2008118550/22 : заявл. 12.05.2008 : опубл. 20.01.2009. EDN: ОВМВWU
30. Alcock C.B., Itkin V.P., Horrigan M.K. Vapour pressure equations for the metallic elements: 298–2500K // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1984. Vol. 23, № 3. P. 309–313. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmqr.1984.23.3.309>

REFERENCES

1. Dubov V.L., Fomin D.V., Galkin N.G. Solid-phase growth and structure of barium disilicide films on Si(111). *Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 114–121. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-7329-2016-15-2-114-121>
2. Patent 2709280 C1 Russian Federation, IPC B25J 21/00. A manipulator operating in a sealed volume / A.A. Nikitin: No. 2019111550 : application 04.16.2019 : published 12.17.2019. (In Russ.).
3. Brinkevich D., Volobuev V., Lukashevich M.G. [et al.]. Structure and electron-transport properties of photoresist implanted by Sb⁺ ions. *Acta Physica Polonica A.*, 2011, vol. 120, no. 1, pp. 46–48. DOI: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.46>
4. Galkin N.G., Goroshko D.L., Dubov V.L., Fomin D.V., Galkin K.N., Chusovitina E.A., Chusovitina S.V. SPE grown BaSi₂ on Si(111) substrates: Optical and photoelectric properties of films and diode heterostructures on their base. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 59, no. SF, art. SFFA11. DOI: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab6b76>
5. Galkin N.G., Fomin D.V., Dubov V.L., Galkin K.N., Pyachin S.A., Burkov A.A. Comparison of crystal and phonon structures for polycrystalline BaSi₂ films grown by SPE method on Si(111) substrate. *Defect and Diffusion Forum*, 2018, no. 386, pp. 48–54.
6. Kesarev A.G., Kondratiev V.V., Lomaev I.L. On the theory of atomic diffusion after ion implantation. *Physics of Metals and Metal Science*, 2018, vol. 119, no. 11, pp. 1160–1165. (In Russ.).
7. Remnev G.E., Tarbokov V.A., Pavlov S.K. Modification of materials under the influence of powerful ion beams. *Physics and Chemistry of Materials Processing*, 2021, no. 2, pp. 5–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2021-2-5-26>
8. Kozlov A.G., Krivozubov O.V., Udod A.N. Thin films of a solid proton-conducting electrolyte based on barium and cerium oxides. *Bulletin of Omsk University*, 2013, no. 2(68), pp. 70–74. (In Russ.).
9. Krioni N.K., Mingazheva A.A., Mingazhev A.D. Increasing the wear resistance of machine parts made of aluminum alloys by ion nitriding with high-energy activation. *Journal of Friction and Wear*,

- 2024, vol. 45, no. 1, pp. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366624700077>
10. Uglov V.V., Cherenda N.N., Khodasevich V.V. [et al.]. Formation of complex Al-N-C layer in aluminium by successive carbon and nitrogen implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, vol. 147, no. 1-4, pp. 332–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00592-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00592-8)
 11. Komarov F.F., Mil'chanin O.V., Parchomenko I.N. [et al.]. Influence of the laser pulse annealing of the silicon implanted with indium and arsenic ions on its optical and structural properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2024, vol. 97, no. 3, pp. 745–752. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-024-02946-7>
 12. Romanov I., Parkhomenko I., Vlasukova L. [et al.]. Fluence effect on photo- and electroluminescence of silica layers implanted with Sn⁺ ions. *Materials Letters*, 2022, vol. 308, art. 131070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131070>
 13. Filintoglou K., Pinakidou F., Arvanitidis J. [et al.]. Size control of GaN nanocrystals formed by ion implantation in thermally grown silicon dioxide. *Journal of Applied Physics*, 2020, vol. 127, no. 3, art. 034302. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5132604>
 14. Kharchenko A.A., Lukashovich M.G., Odzhaev V.B. [et al.]. Correlation of electronic and magnetic properties of thin polymer layers with cobalt nanoparticles. *Particle and Particle Systems Characterization*, 2013, vol. 30, no. 2, pp. 180–184. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201200042>
 15. Sitnikov A.V., Makagonov V.A., Kalinin Y.E. [et al.]. Structure and electrical properties of Con(CoO)100 – n thin-film composites. *Technical Physics*, 2024, vol. 69, no. 6, pp. 1813–1822. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784224060458>
 16. Galkin K.N., Kropachev O.V., Maslov A.M. [et al.]. Electronic structure and optical properties of Ca₂Si films grown on silicon different oriented substrates and calculated from first principles. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2022, vol. 15, no. S3.1, pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.102>
 17. Galkin N.G., Galkin K.N., Kropachev O.V. [et al.]. Formation, structure, and optical properties of singlephase CaSi and CaSi₂ films on Si substrates. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2022, vol. 15, no. S3.1, pp. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.101>
 18. Galkin N.G., Galkin K.N., Dotsenko S.A. [et al.]. Ca₂Si(100) epitaxial films on the Si(111) substrate: Template growth, structural and optical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, vol. 113, art. 105036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105036>
 19. Chusovitin E., Dotsenko S., Chusovitina S. [et al.]. Formation of a thin continuous GaSb film on Si(001) by solid phase epitaxy. *Nanomaterials*, 2018, vol. 8, no. 12, p. 987. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano8120987>
 20. Chernev I.M., Shevlyagin A.V., Galkin K.N. [et al.]. On the way to enhance the optical absorption of a-Si in NIR by embedding Mg₂Si thin film. *Applied Physics Letters*, 2016, vol. 109, no. 4, art. 043902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4960011>
 21. Galkin N.G., Galkin K.N., Chernev I.M. [et al.]. Effect of sacrificial Mg₂Si layers and kinetic parameters on the growth, structure, and optical properties of thin Ca₂Si films on silicon substrates. *Semiconductors*, 2022, vol. 56, no. 7-12, pp. 367–381. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063782622090019>
 22. Jin Y., Fang H., Chen R. [et al.]. Graded distribution and refinement of Mg₂Si in Al–Mg₂Si alloy prepared by traveling magnetic field. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 24, pp. 2319–2331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.152>
 23. Jeon Ju., Lee S.H., Kim S.D. [et al.]. Ultrasound alters the nucleation pathway of primary Mg₂Si in a chemically modified multicomponent Al–Mg₂Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1009, p. 177001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177001>
 24. Chernev I.M., Gournalnik A.S., Subbotin E.Yu. [et al.]. FeSi and CrSi₂ thin films as transparent conductive layers for VIS/SWIR sensitive Mg₂Si films grown on Si. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2023, vol. 87, no. S3, pp. 370–374. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1062873823705718>
 25. Siminel N., Galkin K.N., Arushanov E., Galkin N.G. Photoconductivity study of Ca₂Si epitaxial film on Si(111) substrate. *Vacuum*, 2022, vol. 203, art. 111302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111302>
 26. Myagkov V.G., Bykova L.E., Zhigalov V.S. [et al.]. Solid-state synthesis, magnetic and structural properties of epitaxial D03-Fe₃Rh(001) thin films. *Intermetallics*, 2023, vol. 157, art. 107871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107871>

27. Patent 140712 U1 Russian Federation, IPC H01L 21/265. Mask for ion alloying in silicon carbide plates / V.V. Afanaskin, N.A. Bryukhno, M.S. Vorontsov [et al.]; CJSC GROUP-PA SILICON EL.: No. 2013150369/28: declared 12.11.2013 : publ. 20.05.2014. (In Russ.).
28. Patent 2789662 C1 Russian Federation, IPC H01L 21/02. A method of applying a metal pattern through a rigid mask to an area with another previously applied metal pattern in the manufacture of body covers for uncooled thermosensitive elements / K.A. Kurygin, I.M. Moskalenko, A.A. Abakarov; Mapper LLC.: No. 2022118682: declared 07.07.2022: publ 07.02.2023. (In Russ.).
29. Patent 80048 U1 Russian Federation, IPC G07F 11/16. The device for moving goods in a vending machine / D.V. Shcherbakov; the applicant is the Kom-top Limited Liability Company. : No. 2008118550/22 : application. 05.12.2008: published. 01.20.2009. (In Russ.).
30. Alcock C.B., Itkin V.P., Horrigan M.K. Vapour pressure equations for the metallic elements: 298–2500K. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1984, vol. 23, no. 3, pp. 309–313. DOI: <https://doi.org/10.1179/cmq.1984.23.3.309>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фомин Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент, директор научно-образовательного центра им. К.Э. Циолковского, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ e-office@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5474-5281>

Dmitry V. Fomin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center named after K.E. Tsiolkovsky, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Рябов Илья Александрович – лаборант, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ rybovilay@gmail.com

Ilya A. Ryabov, Laboratory Assistant, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Шольгин Илья Олегович – магистрант 2 года обучения, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ ilia.sholygin235@bk.ru

Ilya O. Sholygin, Master's student of 2 years of study, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Поляков Алексей Вячеславович – младший научный сотрудник, Амурский государственный университет (Благовещенск, Российская Федерация).

✉ polyakov_a_1999@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5104-5966>

Alexey V. Polyakov, Junior Scientific Assistant, Amur State University (Blagoveshchensk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 04.02.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 28.02.2025

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.