РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



路路路路路路

密

密

密

路

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

路路

密

密

密

密

密

路

密

密

密

密

四

B

密

密

路

密

密

密

密

密

密

密

密

路

密



密

密

密

路

密

密

密

密

密

密

密

路路

密

密

密

密

密

密

密

岛

密

密

密

密

路路路

密

密

密

密

密

密

密

密

密

斑

斑

密

密

密



НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 204747

Источник одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника с излучением в нанофотонный волновод

Патентообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)

Авторы: Абрамов Артем Николаевич (RU), Кравцов Василий Андреевич (RU), Иорш Иван Владимирович (RU)

Заявка № 2020143412

Приоритет полезной модели 25 декабря 2020 г. Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 08 июня 2021 г. Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 25 декабря 2030 г.

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

-Telese Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



⁽¹⁹⁾ **RII** ⁽¹¹⁾

204 747⁽¹³⁾ U1

(51) ΜΠΚ *H01L 33/02* (2010.01) *H01S 5/10* (2006.01) *B82Y 20/00* (2011.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01L 33/02 (2021.02); H01S 5/10 (2021.02); B82Y 20/00 (2021.02)

 (21)(22) Заявка: 2020143412, 25.12.2020 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 25.12.2020 	 (72) Автор(ы): Абрамов Артем Николаевич (RU), Кравцов Василий Андреевич (RU), Иорш Иван Владимирович (RU)
Дата регистрации: 08.06.2021 Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 25.12.2020 (45) Опубликовано: 08.06.2021 Бюл. № 16	 (73) Патентообладатель(и): федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)
Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО, ОИС	 (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Matthew R Rosenberger et al, Quantum Calligraphy: Writing Single-Photon Emitters in a Two-Dimensional Materials Platform, ACS Nano, 2019 Jan 22;13(1):904-912. RU 188882 U1, 25.04.2019. RU 188881 U1, 25.04.2019. RU 189453 U1, 22.05.2019. CN 109713094 A, 03.05.2019. JP 20110547777 A, 17.03.2011.

(54) Источник одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника с излучением в нанофотонный волновод

(57) Реферат:

4

4

Ο

2

Ľ

Полезная модель относится к области квантовой оптики. в частности к источникам квантового излучения, может быть И использована для генерации одиночных фотонов в компактных системах квантовой коммуникации, например системах квантового распределения ключей. Источник одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника с излучением в нанофотонный волновод состоит из монослоя WSe2 на подложке из полимера ПММА толщиной 100-400 нм с локально деформированной областью в виде углубления с поперечными размерами 200-500 нм и глубиной 50-300 нм, при этом используют монослой WSe2 с низкой плотностью дефектов, непосредственно под слоем полимера ПММА находится диэлектрический нанофотонный волновод с высоким показателем преломления, расположенный таким образом, чтобы наиболее глубокая точка локально деформированного участка монослоя WSe2 находилась строго над центром волновода на высоте не более 20 нм, а под волноводом расположен слой диэлектрика с низким показателем преломления толщиной не менее 1 мкм на подложке из кремния. Технический результат достигается за счет точного позиционирования источника одиночных фотонов трем пространственным координатам по относительно нанофотонного волновода, что приводит к эффективному излучению одиночных фотонов в оптическую моду волновода. 8 ил.

フ

N





RU 204747 U1

Полезная модель относится к области квантовой оптики, в частности к источникам квантового излучения, и может быть использована для генерации одиночных фотонов в компактных системах квантовой коммуникации, например системах квантового распределения ключей.

- ⁵ Из уровня техники известны источники одиночных фотонов на основе полупроводниковых гетероструктур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (патент RU 188882 U1, МПК H01S 5/10, дата приоритета 13.03.2019, дата публикации 25.04.2019). Генерация одиночных фотонов достигается за счет радиационной рекомбинации в одиночных нуль-мерных квантовых точках пониженной поверхностной
- плотности, формируемых методом контролируемой термической активации. Для селекции одиночных источников и повышения эффективности их излучения в дальнее поле используется интеграция в трех-мерные микрорезонаторы конической формы. Недостатками данного решения являются сложность процесса изготовления, плохо контролируемые оптические свойства отдельных точек вследствие их относительно
 высокой плотности, а также трудность интеграции с оптическим чипом.
- ¹⁵ высокой плотности, а также трудность интеграции с оптическим чипом. Известна модель источника одиночных фотонов, излучающего непосредственно в оптический волновод (патент № WO2006/135789 А2, МПК не классифицирован, дата приоритета 10.06.2006, дата публикации 21.12.2006). Источник представляет собой полупроводниковую нанопроволоку, помещеннную в полость, которая вытравлена в
- 20 материале подложки. Форма полости предусматривает углубления для последующего соединения с волноводом. Недостатком данной модели является сложность позиционирования квантового излучателя относительно волновода. Также, данная модель не позволяет заводить излучение непосредственно в оптический чип.
- Известно устройство для излучения одиночных фотонов на основе локальной 25 деформации двумерного материала (патент № WO 2018/015738 A1, МПК H01L 33/06, дата приоритета 18.07.2016, дата публикации 25.01.2018). Устройство представляет собой низкоразмерную (нуль- или одно-мерную) структуру, состоящую из слоя двумерного материала, помещенного на остроконечный выступ, сформированный на поверхности твердой подложки. В качестве двумерного материала могут использоваться
- 30 однослойный или многослойный графен, гексагональный нитрид бора, а также дихалькогениды переходных металлов. В таких материалах достаточно легко создаются градиенты локальной деформации, которые могут приводить к формированию квантовых точек или проводов и, соответственно, излучению одиночных фотонов. Однако, существенным недостатком данной технической реализации является отсутствие
- 35 точного контроля пространственного профиля и магнитуды локальной деформации двумерного материала и, как следствие, отсутствие контроля над оптическими свойствами формируемых источников одиночных фотонов.

Наиболее близким техническим решением является модель источника одиночных фотонов, описанная в работе M.R. Rosenberger et al., ACS Nano, 2019, 13(1), 904-912 и

- 40 выбранная в качестве прототипа для предлагаемой полезной модели. Модель представляет собой локально деформированный монослой дихалькогенида переходного металла WSe2, выращенный методом химического осаждения из газовой фазы и перенесенный на слой полимера ПММА толщиной 100-400 нм. Источник одиночных фотонов расположен в области локальной пластической деформации полимерного
- 45 слоя, которая создается зондом атомно-силового микроскопа, приведенным в контакт с поверхностью WSe₂. При этом за счет адгезии между полимером и WSe₂ возникает упругая локальная деформация монослоя WSe₂, с пространственным профилем в виде углубления с поперечными размерами 200-500 нм и глубиной 50-300 нм. Основным

недостатком данного решения является то, что генерация одиночных фотонов происходит в свободное пространство, что делает такие источники неэффективными при дальнейшей обработке сигналов на оптическом чипе.

Решается задача эффективной интеграции источников одиночных фотонов на основе 5 двумерных полупроводников с оптическими чипами для использования излучаемых фотонов в компактных системах обработки квантовой информации.

Сущность предлагаемой модели заключается в том, что источник одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника с излучением в нанофотонный волновод состоит из монослоя WSe₂ на подложке из полимера ПММА толщиной 100-400 нм с локально

- деформированной областью в виде углубления с поперечными размерами 200-500 нм и глубиной 50-300 нм, при этом используют монослой WSe₂ с низкой плотностью дефектов, и непосредственно под слоем полимера ПММА находится диэлектрический нанофотонный волновод с высоким показателем преломления, расположенный таким образом, чтобы наиболее глубокая точка локально деформированного участка монослоя
- ¹⁵ WSe₂ находилась строго над центром волновода на высоте не более 20 нм, а под волноводом расположен слой диэлектрика с низким показателем преломления толщиной не менее 1 мкм на подложке из кремния.
- Технический результат достигается за счет точного позиционирования источника одиночных фотонов по трем пространственным координатам относительно нанофотонного волновода, что приводит к эффективному излучению одиночных фотонов в оптическую моду волновода.

Сущность предлагаемой полезной модели поясняется рисунками.

На фиг. 1 представлено схематичное изображение предлагаемой модели источника одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника, вид сбоку: 1 - подложка из кремния, 2 - слой диэлектрика с низким показателем преломления, 3 - диэлектрический нанофотонный волновод с высоким показателем преломления, 4 - слой полимера ПММА, 5

- монослой дихалькогенида переходного металла WSe₂, 6 - локально

30 деформированная область монослоя WSe₂. Модель представляет собой слоистую

структуру, состоящую из твердой подложки из кремния 1, на которую нанесен слой диэлектрика 2 с низким показателем преломления (n<1.5) толщиной не менее 1 мкм. На слое диэлектрика располагается нанофотонный волновод 3, изготовленный из диэлектрика с высоким показателем преломления (n>2.0). Поверх волновода 3 нанесен

- ³⁵ слой полимера ПММА 4 толщиной 100-400 нм, на поверхности которого находится монослой 5 дихалькогенида переходного металла WSe₂, полученный методом эксфолиации из объемного кристалла. Монослой WSe₂ 5 расположен таким образом, чтобы частично перекрывать нанофотонный волновод 3 в плоскости структуры. Область 6 монослоя WSe₂ 5, находящаяся непосредственно над центром волновода 3,
- 40 Областв о монослоя w Se₂ з, находящаяся непосредственно над центром волновода з, деформирована в форме углубления с поперечными размерами 200-500 нм таким образом, чтобы наиболее удаленная от недеформированной поверхности WSe₂ точка монослоя находилась на расстоянии не более 20 нм от поверхности нанофотонного волновода 3.
- 45 На фиг. 2 представлено схематичное изображение предлагаемой модели источника одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника, вид сверху: 1 - подложка из кремния, 2 - слой диэлектрика с низким показателем преломления, 3 - диэлектрический нанофотонный волновод с высоким показателем преломления, 4 - слой полимера

ПММА, 5 - монослой дихалькогенида переходного металла WSe₂, 6 - локально деформированная область монослоя WSe₂.

На фиг. 3 показаны этапы изготовления и работы модели: (а) - изначальная слоистая структура подложка/волновод/полимер/монослой, (б) - нано-индентирование модифицированным зондом атомно-силового микроскопа, (в) - возбуждение полученного источника одиночных фотонов монохроматическим лазерным пучком и излучение одиночных фотонов в волновод. В основе работы модели лежит формирование источника одиночных фотонов вследствие возникновения градиентов локальных напряжений в кристаллической решетке монослоя WSe₂ 5 при локальной

- пональных напряжении в криеталии теской решетие монослоя (1962) с при пональной деформации. За счет взаимодействия экситонов, локализованных в области деформации, с оптической модой нанофотонного волновода 3 значительная часть одиночных фотонов излучается в волновод 3. На этапе (а) изготавливается слоистая структура, которая представляет собой твердую подложку из кремния 1 с нанесенным на нее слоем
- ¹⁵ диэлектрика 2 с низким показателем преломления, на которой размещен диэлектрический нанофотонный волновод 3 с высоким показателем преломления. Волновод покрыт полимерным слоем 4 из ПММА толщиной 100-400 нм, необходимым для фиксации монослоя WSe₂ 5 при его деформации на следующих этапах создания структуры. На поверхности полимера находится монослой WSe₂ 5 с латеральными размерами 10-100
- ²⁰ мкм и низкой плотностью дефектов, полученный методом механической эксфолиации из объемного кристалла WSe₂ и расположенный таким образом по отношению к волноводу 3, чтобы соблюдалось их частичное пространственное перекрытие в плоскости структуры. На этапе (б), модифицированный зонд ACM 7 в полуконтактном режиме работы атомно-силового микроскопа позиционируется над центральной осью
- ²⁵ нанофотонного волновода 3. Затем зонд 7 переводится в контактный режим работы и контролируемо сдвигается вниз, вызывая сначала упругую, а впоследствии пластическую, деформацию полимера 4. При пластической деформации полимера 4, монослой 5 локально двигается по направлению к волноводу 3, достигая необходимой глубины над поверхностью волноводной структуры. Далее зонд 7 отводится вверх, по
- ³⁰ направлению от структуры, при этом монослой WSe₂ 5 остается в контакте с пластически деформированным полимером 4 и не релаксирует. В полученной таким образом локально деформированной области 6 формируется источник одиночных фотонов. На этапе (в), локально деформированная область 6 облучается сфокусированным монохроматическим лазерным пучком, что приводит к возбуждению экситонов,
- ³⁵ монохромати теским лазерным пунком, тто приводит к возоуждению экситонов, локализованных в деформированной области 6 монослоя WSe₂ и их дальнейшей излучательной рекомбинации. Одиночные фотоны генерируются в локально деформированной области 6 монослоя WSe₂ 5 при нерезонансном облучении

непрерывным или импульсным лазером с длиной волны в пределах 400-700 нм или
 резонансном облучении на длине волны источника. Излучение одиночных фотонов,
 как правило, происходит при температурах ниже 50-60 К. Вследствие оптимизированного
 перекрытия локализованного экситона с оптической модой волновода 3 и их
 взаимодействием в ближнем поле, значительная часть одиночных фотонов излучается

взаимодействием в ближнем поле, значительная часть одиночных фотонов излучается в волновод 3 и может быть в дальнейшем использована для обработки квантовой 45 информации на чипе.

На фиг. 4 представлено изображение модифицированного ACM зонда в сканирующем электронном микроскопе, используемого для локальной деформации монослоев WSe₂ и создания источников одиночных фотонов. Поскольку применение для этих целей

RU 204 747 U1

стандартных острых ACM зондов ведет к разрыву монослоя до того момента, как удается создать локально деформированную область необходимой глубины, используются модифицированные зонды. Острие зонда стачивается с помощью фокусированного ионного пучка таким образом, чтобы латеральные размеры

5 получившейся площадки находились в пределах 100-700 нм. Форма оригинального зонда схематично обозначена на фиг. 4 пунктирными линиями.

На фиг. 5 представлен пример реализации предлагаемой модели источников одиночных фотонов, а именно структура, состоящая из кремниевой подложки 1, покрытой слоем оксида SiO₂ 2, с расположенным на ней нанопроводом из фосфида

- ¹⁰ галлия (GaP) в качестве волновода 3, покрытым тонким слоем (400 нм) полимера ПММА 4 и монослоя WSe₂ 5, расположенного поверх полимера 4 над волноводной структурой. На фиг. 5 (а) показано АСМ изображение образца до индентирования, а на фиг. 5 (б) изображение образца в оптическом микроскопе после индентирования, где область локальной деформации 6 расположена над центром волновода 3.
- ¹⁵ На фиг. 6 (а) представлено АСМ изображение деформированной области 6 монослоя WSe₂ 5 в высоком разрешении, а на фиг. 6 (б) -соответствующий профиль деформации вдоль поперечной координаты.

На фиг. 7 представлены результаты измерений оптических свойств изготовленного образца: фиг. 7 (а) спектр фотолюминесценции свободного экситона в монослое WSe₂

- 5, фиг. 7 (б) спектр фотолюминесценции источника одиночных фотонов, фиг. 7 (в) зависимости интенсивности фотолюминесценции экситона и источника одиночных фотонов от мощности лазерной накачки, фиг. 7 (г) затухание фотолюминесценции во времени для свободного экситона и источника одиночных фотонов.
- 25 На фиг. 8 представлен график измеренной корреляционной функции второго порядка от временной задержки между сигналами на детекторах в интерферометре Хэнбери Брауна Твисса для изготовленного источника одиночных фотонов, показывающий однофотонный характер излучения.

Пример реализации полезной модели.

- 30 Для создания источников одиночных фотонов в монослое WSe₂ 5 были изготовлены образцы нано-индентированных структур монослой WSe₂/полимер/волновод/подложка. В качестве волноводов 3 использовались нанопровода из фосфида галлия (GaP) диаметром 200-300 нм и длиной 10-20 мкм, которые осаждались на подложку из кремния 1 со слоем оксида 2 толщиной 1 мкм. Слой полимера ПММА 4 толщиной 400 нм
- ³⁵ наносился на подложку с нанопроводами GaP методом центрифугирования в течение 60 секунд со скоростью вращения 3500 об./мин. Для удаления остатков растворителя подложка с полимером отжигалась в течение 5 минут при температуре 140°C. Толщина получившейся пленки ПММА проверялась с помощью атомно-силовой микроскопии. Монослой WSe₂ получали из объемного кристалла методом механической эксфолиации,
- ⁴⁰ позволяющим изготавливать монослои большого латерального размера (более 50 мкм) с малым количеством дефектов. Для переноса монослоя WSe₂ на образец была использована трансфер система с тремя поступательными и двумя вращательными степенями свободы. Монослой WSe₂ 5 был перенесен на слой ПММА 4 и расположен
- 45 над волноводной структурой 3, частично перекрывая ее в плоскости образца. Для деформации были использованы кремниевые АСМ зонды 7, модифицированные с помощью фокусированного ионного пучка до латерального размера 500 нм. Модификация зонда, таким образом, дает возможность работать с ним как в режиме

сканирования, позволяя позиционировать зонд 7 в заданной точке образца, так и в режиме индентирования, позволяя локально деформировать монослой WSe₂ 5.

Индентирование производилось в контактном режиме работы АСМ. Для продавливания монослоя 5 на глубину 170 нм, основание кантилевера зонда 7 смещалось на 2500 нм

- ⁵ перпендикулярно плоскости образца. Форма получившегося углубления повторяет форму зонда ACM 7, как показано на фиг. 6 (а), где представлено ACM изображение деформированной области. На фиг. 6 (б) представлен срез профиля получившейся деформации в самом глубоком месте. Оптические свойства изготовленных источников одиночных фотонов измерялись при температуре 10-50 К в гелиевом криостате. Образец
- ¹⁰ возбуждался гелий-неоновым лазером с длиной волны 633 нм, а излучение собиралось микро-объективом с увеличением 50х и числовой апертурой NA=0.65 из торца нанопровода. Спектры фотолюминесценции регистрировались спектрометром с дифракционной решеткой 600 штрихов/мм и ПЗС матрицей с охлаждением жидким азотом. Лазерное излучение блокировалось спектральным фильтром.
- ¹⁵ На фиг. 7 показаны результаты оптической характеризации источника одиночных фотонов, в сравнении с оптическими свойствами нейтрального экситона. Нейтральный экситон в монослое WSe₂ 5 излучает сигнал фотолюминесценции со спектральным пиком на частоте примерно 1.75 эВ, как показано на фиг. 7 (а). Пики фотолюминесценции источников одиночных фотонов, получаемых в локально деформированной области
- ²⁰ 6, сдвинуты в область низких энергий относительно экситонного пика. На фиг. 7 (б) представлен пример пика излучения источника одиночных фотонов, с энергией фотона 1.563 эВ и полушириной линии излучения 1.79 нм (3.5 мэВ). Для пика фотолюминесценции источника наблюдается характерное насыщение при увеличении мощности лазерной накачки, как показано на соответствующих зависимостях интенсивности
- ²⁵ фотолюминесценции от мощности на фиг. 6 (в). На фиг. 6 (г) представлены кривые затухания сигнала фотолюминесценции для нейтрального экситона и источника одиночных фотонов. В сравнении со временем жизни нейтральных экситонов, которое составляет менее 50 пс, времена жизни источников одиночных фотонов, излучающих в волновод, варьируются в диапазоне 5-20 не. Яркость излучения при детектировании
- ³⁰ из торца волновода 3 составляет примерно 10⁵ отсчетов в секунду, что с поправкой на низкую эффективность вывода излучения из волновода в свободное пространство транслируется в скорость излучения фотонов в волновод порядка 5.10⁶ отсчетов в секунду.
- ³⁵ Однофотонный характер фотолюминесценции изготовленного образца проверялся путем измерения корреляционных функций второго порядка G⁽²⁾(t), где t - время между детектированием фотонов на двух детекторах в интерферометре Хэнбери Брауна

Твисса. На фиг. 8 представлен график корреляционной функции второго порядка $G^{(2)}$ (t), полученной для источника одиночных фотонов, излучающего в нанопровод из GaP.

Значение корреляционной функции второго порядка для нулевой задержки G⁽²⁾(0) составило 0.18, что значительно меньше, чем соответствующая величина для двухфотонного излучения 0.5, и подтверждает высокую степень однофотонности излучения.

40

⁴⁵ Таким образом, показано, что конструкция предлагаемой модели позволяет достичь излучения одиночных фотонов в высокоиндексный диэлектрический нанофотонный волновод, что в свою очередь дает возможность интегрировать источник одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника с компактными оптическими чипами.

RU 204 747 U1

При этом, эффективность излучения в волновод хорошо контролируется за счет точного позиционирования источника одиночных фотонов относительно волновода в процессе изготовления модели. Дополнительно, модель характеризуется простотой изготовления, так как основана на локальной деформации двумерного полупроводника и не требует сложных процедур роста традиционных полупроводниковых структур.

(57) Формула полезной модели

Источник одиночных фотонов на основе двумерного полупроводника с излучением в нанофотонный волновод, состоящий из монослоя WSe₂ на подложке из полимера

- ПММА толщиной 100-400 нм с локально деформированной областью в виде углубления с поперечными размерами 200-500 нм и глубиной 50-300 нм, отличающийся тем, что используют монослой WSe₂ с низкой плотностью дефектов, непосредственно под слоем полимера ПММА находится диэлектрический нанофотонный волновод с высоким показателем преломления, расположенный таким образом, чтобы наиболее глубокая
- ¹⁵ точка локально деформированного участка монослоя WSe₂ находилась строго над центром волновода на высоте не более 20 нм, а под волноводом расположен слой диэлектрика с низким показателем преломления толщиной не менее 1 мкм на подложке из кремния.

20

5

25

30

35

40







Фиг. 2







Фиг. 4







Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8