**Гибридные нанофотонные структуры на основе**

**дихалькогенидов переходных металлов для эффективной**

**генерации света на оптическом чипе**

***Шепелев Е.А.1, Кавер А.К.2, Ситнянский В.А.1 , Шорохов А.С.1***

*Студент 5-ого курса специалитета*

*1Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,*

*физический факультет, Москва, Россия*

*2Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в городе Севастополе,*

*факультет естественных наук, Севастополь, Россия*

*E–mail:* *shepelev.ea20@physics.msu.ru*

Целью данной работы являются разработка и создание резонансной волноводной системы из нитрида кремния, состоящей из оптически связанных резонансных наноантенн для эффективного заведения на чип излучения вертикально ориентированных дипольных излучателей в гетероструктурах из тонких плёнок дихалькогенидов переходных металлов $MoSe\_{2}/WSe\_{2}$. Было проведено численное исследование таких структур, в результате которого были получены оптимальные геометрические параметры волноводной системы, позволяющие добиться наилучших результатов эффективности оптической связи.

С развитием квантовых технологий растет необходимость в миниатюризации фотонных схем. В связи с этим проектирование интегральных оптических чипов приобретает особую значимость, поскольку они обеспечивают возможность объединения множества функционально разнообразных компонентов на одном кристалле. Процесс создания таких схем требует внедрения источников идентичных одиночных фотонов, что делает разработку однофотонных излучателей ключевой задачей в этой области. Особый интерес представляют однофотонные источники на основе двумерных материалов. В ряде последних работ были изучены такие материалы, как селенид индия InSe и селенид галлия GaSe, гексагональный нитрид бора hBN, дихалькогениды переходных металлов [1]. Пример интеграции монослоев из дихалькогенида переходных металлов на чип был продемонстрирован ранее [2]. Один из значительных недостатков такого подхода состоит в том, что ориентация дипольного излучателя в монослое случайна. Подобной проблемы можно избежать, если использовать гетероструктуры из дихалькогенидов переходных металлов. Дипольные источники в таких пленках направлены перпендикулярно плоскости пленки, что уменьшает возможные радиационные потери при заведении [3]. В данной работе была предложена резонансная волноводная структура для эффективной интеграции излучателей в гетероструктуре из $MoSe\_{2}/WSe\_{2}$. В гетероструктуре наблюдаются более долгоживущие в сравнении с монослоями экситоны, ориентированные перпендикулярно плоскости образца. Данные экситоны излучают при энергии 1.35 эВ [3]. В связи с этим геометрические параметры волноводной структуры были подобраны таким образом, чтобы обеспечить высокую добротность резонанса на данной длине волны.

Материалом резонансной волноводной структуры был выбран нитрид кремния, так как он обладает низким поглощением в заданной области длин волн. Структура представляет собой брэгговский волновод, который в свою очередь состоит из двух диэлектрических зеркал и резонатора с периодически меняющимся эффективным показателем преломления, ширина частиц которого уменьшается по параболическому закону от краев к центру, что позволяет поддерживать резонанс на заданной длине волны. Для подбора оптимальных геометрических параметров резонансного волновода было произведено численное моделирование методом конечной разности во временной области (FDTD). На основе произведенных расчётов были выбраны следующие параметры волновода: ширина волновода $W=0.85 мкм$, высота $H=0.4 мкм$, период$ Λ=0.3 мкм$, длина резонатора $L\_{cav}=6 мкм,$ длина брэгговского отражателя $L\_{ref}=3 мкм.$ При данной геометрии были рассчитаны зависимости коэффициента оптической связи и фактора Парселла от длины волны при положении дипольного источника в центре резонатора на его поверхности. Под коэффициентом оптической связи понимается отношение энергии, пройденной через волновод, к энергии, испущенной дипольным источником. Для сравнения, аналогичным образом был рассчитан стандартный прямоугольный волновод с такими же значениями высоты и ширины. В результате коэффициент оптической связи резонансного волновода на заданной длине волны оказался в 7 раз больше, чем у прямоугольного, а фактор Парселла – больше в 12 раз. Также структура была дополнена дифракционными решетками для заведения и выведения излучения в плоскость и из плоскости образца. Дизайн дифракционной решетки состоял из адиабатического расширителя и периодически расположенных полос. В итоге, с помощью численного моделирования была подобрана структура для эффективной интеграции излучателей в гетероструктурах из дихалькогенидов переходных металлов.

Используя комбинацию методов химического осаждения при низком давлении, электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления был изготовлен образец, представляющий собой массив из резонансных структур, дополненных прямоугольными волноводами. Полученные образцы были охарактеризованы с помощью оптической и электронной растровой микроскопии, в ходе которых было выявлено, что структуры полностью соответствуют заявленным требованиям. Далее была измерена спектральная зависимость пропускания структур различных массивов в диапазоне длин волн от 900 до 960 нм с шагом один нм. Внутри каждого массива спектр снимался со структур с резонансной частью внутри, а также для обычных прямоугольных волноводов для сравнения. Измерение производились с помощью волоконного лазера, работающего в режиме суперконтинуума, излучение которого заводилось на дифракционную решетку структуры под углом 20 градусов к нормали. Для контроля поляризации падающего излучения была установлена полуволновая пластинка и призма Глана-Тейлора. Выходной сигнал детектировался с помощью CMOS-камеры. Из полученных зависимостей пропускания был сделан вывод, что данная структура поддерживает резонанс на длине волны 920 нм, что имеет достаточно хорошее согласие с результатами, полученными с помощью численного моделирования.

 В результате в данной работе была предложена концепция волноводной системы из нитрида кремния для эффективной фотонной связи с дипольными излучателями в гетероструктурах из дихалькогенидов переходных металлов $MoSe\_{2}/WSe\_{2}$. Численный анализ данных структр показал, что фактор Парселла в таких системах больше по сравнению с прямоугольным волноводом в 12 раз.

**Литература**

1. Liu, Xiaolong & Hersam, Mark. 2D materials for quantum information science. Nature Reviews Materials (2019).
2. Peyskens, F., Chakraborty, C., Muneeb, M. et al. Integration of single photon emitters in 2D layered materials with a silicon nitride photonic chip. Nat Commun 10, 4435 (2019).
3. Rivera, P., Schaibley, J., Jones, A. et al. Observation of long-lived interlayer excitons in monolayer MoSe2–WSe2 heterostructures. Nat Commun 6, 6242 (2015).