

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 535.343.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-96-105>
EDN ZZDBRB



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Конфигурация Кречмана как метод увеличения оптического поглощения в двумерных графеноподобных полупроводниках

А.А. Гуськов[@],
Н.В. Безвиконный,
С.Д. Лавров

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: guskov@mirea.ru

Резюме

Цели. Оптические свойства двумерных полупроводниковых материалов, в частности монослойных дихалькогенидов переходных металлов, предоставляют новые возможности в области нано- и оптоэлектроники. Однако практическое применение этих материалов ограничено из-за низкой способности поглощать свет, вызванной их высокой прозрачностью. При работе с такими тонкими структурами возникает возможность использования множества физических механизмов, включая резонансные и плазмонные эффекты, которые можно настроить для улучшения эффективности поглощения света. Цель данной работы – оптимизация поглощения света в двумерном полупроводнике в конфигурации Кречмана с учетом указанных выше явлений для последующего применения в устройствах оптоэлектроники.

Методы. Для проведения моделирования использован метод конечных элементов решения уравнений Максвелла в структуре, представляющей стандартную конфигурацию Кречмана. Проведен параметрический анализ влияния трех параметров: угла падения света, толщины металлического слоя и толщины полупроводникового слоя.

Результаты. Проведено исследование конфигурации модели Кречмана с целью достижения максимального оптического поглощения в двумерной полупроводниковой пленке. Определены параметры, при которых наблюдается наибольшая «площадь» пика поглощения, включая толщину металлического слоя и угол падения излучения. На основе полученных результатов выявлены лучшие параметры для достижения наивысшей степени поглощения в двумерной пленке полупроводника.

Выводы. На основе численных исследований конфигурации модели Кречмана обнаружено, что оптимальными параметрами для максимального поглощения в монослойной пленке являются: толщина слоя серебра, не превышающая 20 нм, и угол падения света от 55° до 85°. Установлено, что максимальное поглощение в двумерной пленке составляет лишь часть от общего поглощения всей структуры. Таким образом, для достижения максимальной эффективности в определенных оптоэлектронных приложениях необходим индивидуальный подход к выбору параметров.

Ключевые слова: двумерные полупроводники, дихалькогениды переходных металлов, поверхностный плазмонный резонанс, плазмонные эффекты, наноструктурированные металлические пленки

• Поступила: 26.09.2023 • Доработана: 18.01.2024 • Принята к опубликованию: 22.05.2024

Для цитирования: Гуськов А.А., Безвиконный Н.В., Лавров С.Д. Конфигурация Кречмана как метод увеличения оптического поглощения в двумерных графеноподобных полупроводниках. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):96–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-96-105>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Kretschmann configuration as a method to enhance optical absorption in two-dimensional graphene-like semiconductors

Andrey A. Guskov[@],
Nikita V. Bezvikonnyi,
Sergey D. Lavrov

MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: guskov@mirea.ru

Abstract

Objectives. The optical properties of two-dimensional semiconductor materials, specifically monolayered transition metal dichalcogenides, present new horizons in the field of nano- and optoelectronics. However, their practical application is hindered by the issue of low light absorption. When working with such thin structures, it is essential to consider numerous complex factors, such as resonance and plasmonic effects which can influence absorption efficiency. The aim of this study is the optimization of light absorption in a two-dimensional semiconductor in the Kretschmann configuration for future use in optoelectronic devices, considering the aforementioned phenomena.

Methods. A numerical modeling method was applied using the finite element method for solving Maxwell's equations. A parametric analysis was conducted focusing on three parameters: angle of light incidence, metallic layer thickness, and semiconductor layer thickness.

Results. Parameters were identified at which the maximum area of absorption peak was observed, including the metallic layer thickness and angle of light incidence. Based on the resulting graphs, optimal parameters were determined, in order to achieve the highest absorption percentages in the two-dimensional semiconductor film.

Conclusions. Based on numerical studies, it can be asserted that the optimal parameters for maximum absorption in the monolayer film are: Ag thickness <20 nm and angle of light incidence between 55° and 85°. The maximum absorption in the two-dimensional film was found only to account for a portion of the total absorption of the entire structure. Thus, a customized approach to parameter selection is necessary, in order to achieve maximum efficiency in certain optoelectronic applications.

Keywords: two-dimensional semiconductors, transition metal dichalcogenides, surface plasmon resonance, plasmon effects, nanostructured metal films

• Submitted: 26.09.2023 • Revised: 18.01.2024 • Accepted: 22.05.2024

For citation: Guskov A.A., Bezvikonnyi N.V., Lavrov S.D. Kretschmann configuration as a method to enhance optical absorption in two-dimensional graphene-like semiconductors. *Russ. Technol. J.* 2024;12(4):96–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-4-96-105>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на уникальные свойства двумерных полупроводниковых материалов, их интеграция в устройства нано- и оптоэлектроники все еще остается значительной проблемой. Так, например, монослойные дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), такие как MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 и другие, хотя и обладают потенциалом для применения в оптических детекторах и фотовольтаических элементах, имеют существенный недостаток, который и проистекает из их двумерности – высокая оптическая прозрачность. В [1] продемонстрировано, что двумерная пленка MoS_2 поглощает не более 10% падающего света в видимом оптическом диапазоне, что недостаточно для создания на его основе эффективных фоточувствительных элементов. Однако наиболее очевидное решение данной проблемы, заключающееся в увеличении собственной толщины полупроводника, не может быть реализовано из-за почти мгновенного перехода из прямозонного в непрямозонный полупроводник, что ведет к последующей потере его эффективности в качестве светочувствительного элемента.

На сегодняшний день существует множество способов решения указанной проблемы. Их условно можно разделить на две основные группы. Первая группа использует интерференционные эффекты, возникающие при применении резонатора Фабри – Перо [2–4], тогда как вторая группа опирается на использование локальных или поверхностных плазмонных резонансов [5–10].

Так, в работе [3] показано, что поглощение света в двумерной пленке MoS_2 может достигать 70%, а в пленке WSe_2 – 75% благодаря включению в резонатор слоя гексагонального нитрида бора. Работа [11] демонстрирует двукратное теоретическое и шестикратное экспериментальное увеличение поглощения двумерной пленки MoS_2 почти во всем видимом спектре при изменении структуры с $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ на $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{Si}$ за счет возникновения интерференции за счет многократных отражений от интерфейсов воздух/ SiO_2 и SiO_2/Au .

Несмотря на необходимость применения значительно более сложных технологических методов и подходов для использования плазмонных эффектов, они зачастую оказываются более эффективными. Например,

с использованием наночастиц или плазмонных антенн происходит резонансное усиление электромагнитного поля на границе раздела металл/полупроводник, что позволяет концентрировать свет непосредственно в двумерные структуры [5]. За последние несколько лет предпринимались неоднократные попытки усилить сигнал фотолуминесценции в монослоях ДПМ (например, таких как MoS_2 , WS_2 и WSe_2) путем нанесения на поверхность ДПМ одиночных металлических наночастиц или их массивов [6, 7]. Благодаря своей относительной простоте по сравнению с другими технологическими методами создания плазмонных структур, этот метод может быть использован для разработки фоточувствительных устройств [12, 13].

Много экспериментальных и теоретических работ посвящено упорядоченным плазмонным структурам, нанесенным на двумерные полупроводники [8–10]. Одним из их ключевых преимуществ является возможность корректировки рабочих характеристик оптических устройств путем модификации формы и геометрии плазмонных элементов [14, 15].

Стоит также отметить возможность комбинации плазмонных и интерференционных методик, что подтверждается результатами, опубликованными в работе [16]. Было получено поглощение 40% в монослое MoS_2 в видимом диапазоне при использовании комбинации интерференционного диэлектрического покрытия и наноразмерных бороздок. Также в работе [17] показан метод создания упорядоченных серебряных плазмонных структур на поверхности волновода. Было продемонстрировано почти 95%-е суммарное поглощение во всей структуре (и 70%-е поглощение в монослое MoS_2 , в частности) за счет использования геометрии, которая комбинирует интерференционные и плазмонные эффекты.

Все вышеупомянутые методы основаны на эффекте локального плазмонного резонанса, который подразумевает поглощение в металлических плазмонных наноструктурах, что не является оптимальным. Поверхностный плазмонный резонанс при определенных условиях может быть лишен этих недостатков. К настоящему времени представлено несколько работ, в которых показаны преимущества использования поверхностного плазмонного резонанса в геометрии Кречмана [18, 19]. В работе [20] высокое поглощение в ДПМ (достигающее почти 100%) было

получено при нанесении двумерной пленки ДПМ непосредственно на поверхности диэлектрика. Вдоль интерфейса полупроводник/диэлектрик идет распространение стоячей плазмонной волны, за счет чего и происходят локализация падающего излучения в ДПМ и увеличение его общего поглощения. Стоит обратить внимание, что в этой работе высокое поглощение достигнуто не в самой двумерной пленке ДПМ, а именно во всей структуре, включая периодическую полосковую плазмонную решетку из золота.

Однако к настоящему времени использование геометрии Кречмана для увеличения оптического поглощения в ДПМ все еще не отработано до прикладного уровня. Несмотря на то, что она принципиально технологически проще, чем создание плазмонных структур литографическими методами, для ее успешного применения требуется больше теоретических исследований, которые нужны для оптимизации ее использования в комбинации с двумерными пленками полупроводников. При этом важным является сам физический механизм детектирования оптического излучения в описанных выше структурах. В них наибольший вклад в фототок вносят фотовольтаический эффект и эффект фотопроводимости [21–23], которые возникают в самом наноразмерном слое ДПМ. Таким образом для создаваемых фоточувствительных элементов главную роль играет не общее поглощение в создаваемых многослойных структурах, а именно поглощение в самом ДПМ, которое, очевидно, уже может быть значительно ниже. Данная работа посвящена теоретическому моделированию применения геометрии Кречмана для оценки возможности увеличения поглощения в двумерном полупроводниковом слое, а не во всей структуре, что особенно актуально для приложений фотовольтаики.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Моделируемая структура состояла из стеклянной призмы с показателем преломления приблизительно равным 1.5 [24, 25], на которую был нанесен тонкий металлический слой и двумерная пленка ДПМ (рис. 1). В конфигурации Кречмана обычно используются такие металлы, как золото [26, 27], медь [28, 29], алюминий [30] или платина [31]. Для генерации плазмонных волн наибольшей интенсивности необходимо выбрать материал с наибольшим по модулю значением ϵ' (действительная часть диэлектрической проницаемости) и малым значением ϵ'' (мнимая часть диэлектрической проницаемости) в выбранном видимом оптическом диапазоне [30]. В данном случае серебро является оптимальным выбором. Следует отметить, что медь и золото демонстрируют чуть меньшую эффективность в выбранном диапазоне длин волн. Однако применение золота

коммерчески нецелесообразно, в то время как поверхность меди может быть покрыта поглощающим оксидным слоем, что существенно уменьшает эффективность поверхностных плазмонов [32]. Именно поэтому в данной работе в качестве металла использовалось серебро, оптические константы которого были взяты из [33]. В качестве полупроводниковой пленки был использован WSe_2 , т.к. это один из наиболее изученных двумерных полупроводников, а его оптические константы хорошо известны как для монослойного образца, так и для многослойных [34]. Данный подход можно применить для любого типа ДПМ с известными оптическими константами.

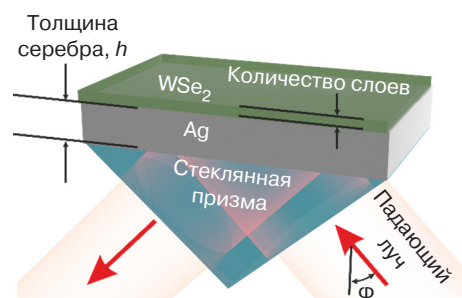


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой структуры

Моделирование распространения оптического излучения в рассматриваемой структуре проводилось при использовании программного пакета *COMSOL Multiphysics*¹ в модуле расширения «Волновая оптика». В исследуемой конфигурации есть несколько ключевых параметров, которые вносят наибольший вклад в результаты моделирования. Такие параметры как толщина серебра и количество слоев ДПМ обладают технологическими ограничениями и могут быть выбраны в широком диапазоне толщин. Также варьируемым параметром является угол падения оптического излучения на границу раздела металл/диэлектрик. При этом важным для геометрии Кречмана является использование именно поперечной магнитной моды (transverse magnetic mode) падающего излучения, т.к. именно она является необходимым условием для генерации поверхностных плазмонных волн. Длина волны падающего оптического излучения равнялась 740 нм, что соответствует положению экситонного пика для WSe_2 . Варьирование этих параметров дает возможность менять распределение электрического и магнитного полей в структуре, что позволяет определить параметры для наибольшей возможной плотности мощности оптического электромагнитного излучения в области двумерной пленки полупроводника.

¹ <https://www.comsol.com/>. Дата обращения 01.06.2023. / Accessed June 01, 2023.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены графики зависимости максимального значения поглощения от количества слоев полупроводниковой пленки, угла падения света и толщины серебряного слоя. Под этим значением в данном случае подразумевается максимальное значение среди всех других варьируемых параметров.

На рис. 2а в координатах угла падения и количества слоев показаны максимальные значения для всех прочих параметров (в данном случае это толщина серебряного слоя). То есть, среди наборов графиков в координатах угла падения и количества слоев ДПМ были взяты максимальные значения поглощения для всех значений толщины серебряного слоя. Если взять точку с максимальным значением поглощения 99% (по координатам количества слоев ДПМ 40 и угла падения 80°), то по любому другому графику (рис. 2б и в) можно определить значение третьей координаты – толщины слоя серебра, при которой это максимальное значение достигается. Так из рис. 2б, в видно, что это значение толщины слоя серебра составляет ≈ 8 нм.

Из рис. 2а, б видно, что в такой конфигурации модели Кречмана максимального значения поглощения в ДПМ (близкого к 100%) удастся достичь только при большом количестве слоев полупроводника (от 15 и более). Тем не менее, это показывает, что достижение такого большого процента поглощения возможно именно в полупроводниковом слое (который может являться проводящим каналом для устройств оптоэлектроники), а не во всей структуре (как, например, было показано в работах, проанализированных во введении настоящей статьи).

Помимо максимального значения оптического поглощения характерной величиной является «площадь» пика поглощения. Эту величину необходимо учитывать, поскольку, например, при разных углах падения луча максимальные значения оптического

поглощения могут быть одинаковы, однако «площади» этих пиков поглощения могут кардинальным образом отличаться друг от друга. Этот факт может быть определяющим при выборе конфигурации для соответствующих приложений. Поэтому также был рассчитан график зависимости величины «площади» пика поглощения от количества слоев полупроводниковой пленки, угла падения света и толщины серебряного слоя. Результаты данного расчета приведены на рис. 3. Под «площадью» пиков в данном случае понимается количество точек, значение которых выше 68% (2σ , где σ – среднеквадратическое отклонение), от максимума поглощения. Данный анализ также необходим, потому что если пик поглощения очень узкий по каким-либо координатам, то технологически создать структуру с такими точными допусками довольно сложно. Именно поэтому важно определение не только максимального значения поглощения, но и его «площади».

Рис. 3в демонстрирует конкретные параметры, при которых достижима большая «площадь» пиков поглощения. Так, например, видно, что большая «площадь» пика поглощения достигается при толщине слоя серебра до 5 нм и угле падения от 42° до 60° (из рис. 2в видно, что этот пик примерно соответствует значению поглощения 50%).

На рис. 4 приведен график зависимости поглощения в ДПМ от толщины серебряного слоя и угла падения света. На вставке пунктирной белой линией выделена область с максимальным значением поглощения. Можно сделать вывод, что использование монослойного ДПМ не очень выгодно с точки зрения достижения высокого оптического поглощения (рис. 4 демонстрирует максимально достижимое значение поглощения в 40%). Однако для устройств наноэлектроники и в других приложениях необходимо использование энергоэффективных полупроводников, к которым относятся именно монослойные ДПМ,

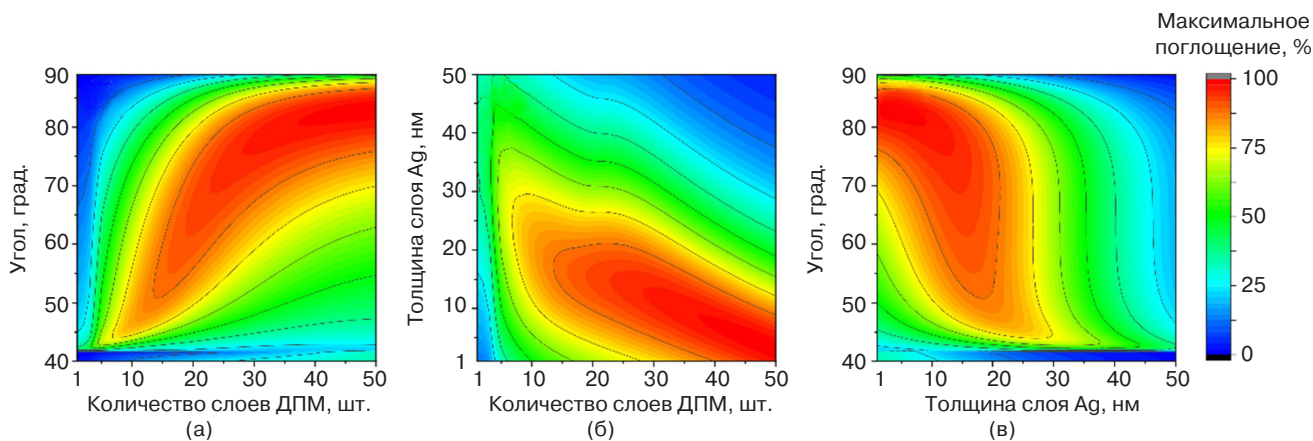


Рис. 2. Графики зависимости максимального значения поглощения в WSe_2 в конфигурации с однородным слоем серебра в зависимости от: (а) угла падения излучения и количества слоев ДПМ, (б) толщины слоя Ag и количества слоев ДПМ, (в) угла падения излучения и толщины слоя Ag

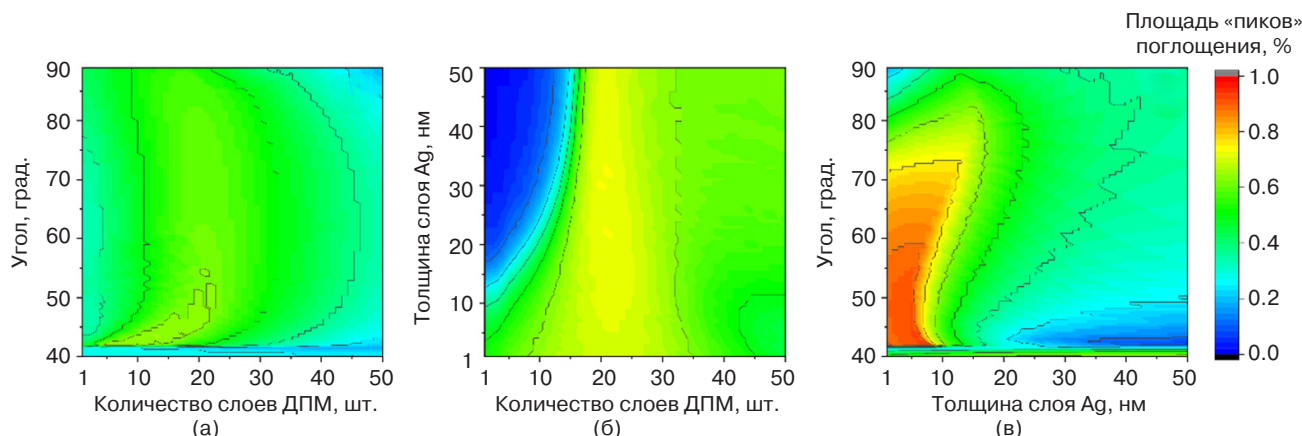


Рис. 3. Графики зависимости величины «площади» пиков поглощения в WSe_2 в конфигурации с ровным слоем серебра в зависимости от: (а) угла падения излучения и количества слоев ДПМ, (б) толщины слоя Ag и количества слоев ДПМ, (в) угла падения падающего излучения и толщины слоя Ag

за счет своей прямой запрещенной зоны. Также это может быть выгодно с точки зрения интеграции и миниатюризации устройств. Отсюда очевиден интерес к поиску методов увеличения поглощения именно в однослойной пленке. Из рис. 4 хорошо видно, что оптимальными значениями параметров для достижения максимального поглощения в монослойной пленке являются: толщина серебряного слоя 37 нм и угол падения падающего излучения 42.1° .

Выше было указано, что важной исследуемой величиной является поглощение именно полупроводниковым слоем. На рис. 5 сплошными линиями показаны графики поглощения, отражения и пропускания всей структуры в зависимости от угла

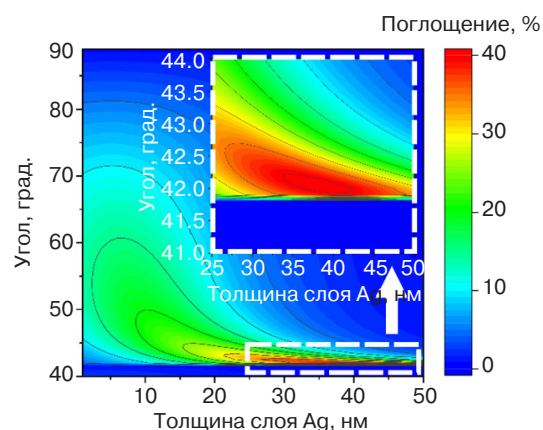


Рис. 4. График зависимости поглощения в ДПМ от толщины серебряного слоя и угла падения света

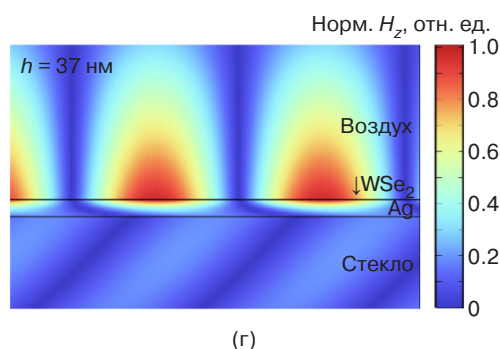
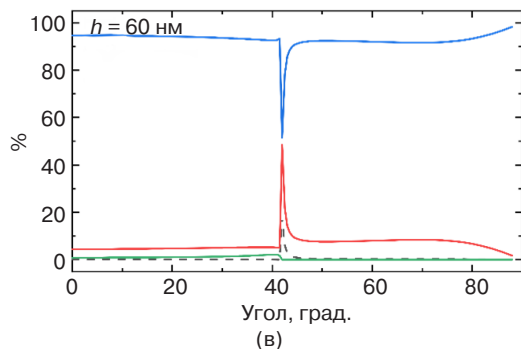
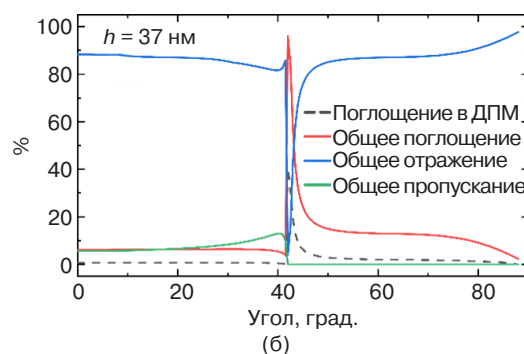
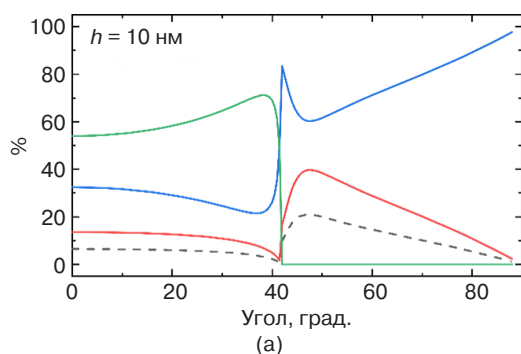


Рис. 5. Графики поглощения, отражения и пропускания в зависимости от угла падения света для структур с толщиной серебряного слоя 10 (а), 37 (б) и 60 (в) нм и нормированный график (г) распределения магнитного поля (H_z -компонента)

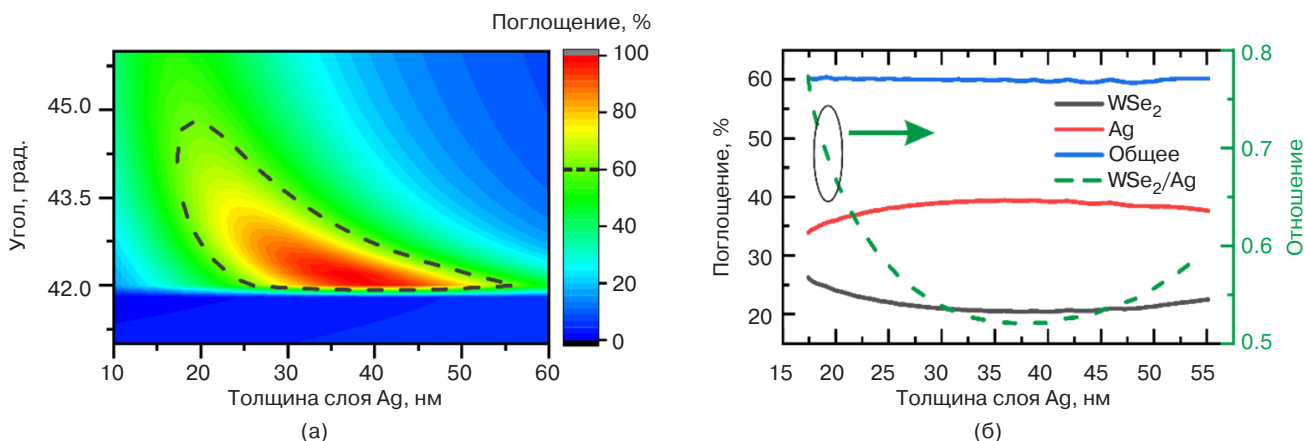


Рис. 6. Карта оптического поглощения во всей структуре в зависимости от толщины серебряного слоя и угла падения луча (а) рассчитанные значения поглощения в пленке WSe_2 и Ag по отдельности в зависимости от толщины слоя Ag (б)

падения света для разных толщин серебряного слоя, а пунктирным – графики поглощения именно полупроводникового слоя. Это типовые графики, которые возникают при использовании геометрии Кречмана [35].

Ширина пиков поглощения свидетельствует об увеличении поглощения именно за счет плазмонного резонанса. На рис. 5г показан график распределения магнитного поля (H_z -компонента) в структуре с толщиной серебра 37 нм и угле падения света 41.2° , т.е. в пике плазмонного резонанса и поглощения на рис. 4. Здесь можно увидеть стоячие волны, вид которых характерен именно для поверхностного плазмонного резонанса. Также можно заметить, что в данном случае поглощение в пленке полупроводника составляет всего половину от общего поглощения структуры.

На рис. 6а представлена карта поглощения всей структуры в зависимости от толщины серебряного слоя и угла падения (толщина WSe_2 – один монослой). В качестве примера был выбран контур графика с уровнем поглощения 60% (черный пунктирный контур). Из графика видно, что общего поглощения, равного или превышающего 60%, можно достичь при использовании различных комбинаций толщины металла и угла падения. Однако это не означает, что поглощение в ДПМ будет максимальным. Для демонстрации этого эффекта далее вдоль белой линии со стрелками был проведен расчет поглощения в монослойной пленке, серебре, и рассчитано отношение этих поглощений (черная, красная и пунктирная зеленая линии на рис. 6б). Хорошо видно, что на всем графике поглощение всей структуры составляет 60%, однако графики поглощения отдельных слоев структуры не являются постоянными. Пунктирный зеленый график показывает, что отношение поглощения в полупроводнике к поглощению в металле может варьироваться от 0.7 до 0.5, т.е. отличаться почти в 1.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы выполнено теоретическое исследование оптического поглощения в полупроводниковой пленке WSe_2 в структуре с конфигурацией Кречмана с учетом таких параметров как толщина WSe_2 , толщина серебряного слоя и угол падения света. При длине волны экситонного пика (740 нм) высокий уровень поглощения (более 80%) достигается при толщине WSe_2 от 8 нм и выше (что соответствует 15 монослоям). В этом случае толщина серебряного слоя должна составлять до 20 нм, а угол падения должен находиться в диапазоне от 50° до 85° . Для достижения 100%-го поглощения необходима толщина WSe_2 порядка 22 нм и более (что соответствует 40 слоям), значение толщины слоя Ag должно быть меньше 10 нм, а угол падения – в диапазоне от 55° до 85° .

При этом максимально достижимая «площадь» пика поглощения наблюдается при толщине серебряного слоя до 5 нм и угле падения – между 42° и 60° . Для монослойной пленки оптимальные показатели поглощения достигаются при толщине серебряного слоя 37 нм и угле падения 42.1° . При таких условиях общее поглощение в структуре составляет 100%, тогда как поглощение в монослойной пленке составляет 40%.

Следует подчеркнуть важность определения оптимальных параметров для поглощения непосредственно в полупроводниковой пленке. Несмотря на одинаковые показатели поглощения во всей структуре, соотношение поглощений между полупроводниковым слоем WSe_2 и металлическим слоем Ag может варьироваться в диапазоне от 0.7 до 0.5. Эта информация имеет ключевое значение для разработки устройств нано- и оптоэлектроники, таких как фототранзисторы и фотодетекторы с двумерным полупроводниковым каналом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Основные полученные результаты были выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FSFZ-2023-0005). Авторы благодарят за поддержку РТУ МИРЭА (грант «Для молодых ученых» НИЧ-55 «Поляризационно-чувствительные оптические детекторы на основе двумерных полупроводников») и Фонд содействия инновациям по программе «УМНИК» по договору № 18383ГУ/2023 от 09.08.2023 г.

ACKNOWLEDGMENTS

The main results obtained were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment No. FSFZ-2023-0005). The authors thank RTU MIREA for the support (grant “For Young Scientists” NICH-55 “Polarization-sensitive optical detectors based on two-dimensional semiconductors”) and the Foundation for Promotion of Innovations under the UMNIC program (contract No. 18383GU/2023 dated 09.08.2023).

Вклад авторов

А.А. Гуськов – теоретическое моделирование, проведение численных расчетов с использованием метода конечных элементов для решения уравнений Максвелла, написание текста статьи.

Н.В. Безвиконный – визуализация и систематизация результатов, создание графиков и диаграмм, иллюстрирующих ключевые параметры и зависимость эффективности поглощения света от различных факторов.

С.Д. Лавров – общее руководство работой, формулирование исследовательской задачи, стратегическое направление проекта, обеспечение достижения поставленных целей и высокого качества итоговых результатов.

Authors' contributions

A.A. Guskov – theoretical modeling, conducting numerical calculations using the finite element method to solve Maxwell's equations, and writing the text of the article.

N.V. Bezvikonnyi – visualization and systematization of results, creating graphs and diagrams illustrating key parameters and the dependence of light absorption efficiency on various factors.

S.D. Lavrov – overall project supervision, formulation of the research problem, strategic direction of the project, ensuring the achievement of set goals and high quality of the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Liu J.-T., Wang T.-B., Li X.-J., Liu N.-H. Enhanced Absorption of Monolayer MoS₂ with Resonant Back Reflector. *J. Appl. Phys.* 2014;115:193511. <https://doi.org/10.1063/1.4878700>
2. Jeong H.Y., Kim U.J., Kim H., et al. Optical Gain in MoS₂ via Coupling with Nanostructured Substrate: Fabry–Perot Interference and Plasmonic Excitation. *ACS Nano*. 2016;10(9):8192–8198. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b03237>
3. Huang X., Feng X., Chen L., Wang L., Tan W.C., Huang L., Ang K.-W. Fabry-Perot Cavity Enhanced Light-Matter Interactions in Two-Dimensional van Der Waals Heterostructure. *Nano Energy*. 2019;62:667–673. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.05.090>
4. Kumari S., Dalal J., Kumar V., Kumar A., Ohlan A. Emerging Two-Dimensional Materials for Electromagnetic Interference Shielding Application. *Int. J. Mol. Sci.* 2023;24(15):12267. <https://doi.org/10.3390/ijms241512267>
5. Gorbatova A.V., Khusyainov D.I., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Buryakov A.M., Mishina E.D. A Photoconductive THz Detector Based on a Superlattice Heterostructure with Plasmonic Amplification. *Tech. Phys. Lett.* 2020;46(11):1111–1115. <https://doi.org/10.1134/S1063785020110218>
6. Yu L., Liu D., Qi X.-Z., Xiong X., Feng L.-T., Li M., Guo G.-P., Guo G.-C., Ren X.-F. Gap Plasmon-Enhanced Photoluminescence of Monolayer MoS₂ in Hybrid Nanostructure. *Chinese Phys. B*. 2018;27(4):047302. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/4/047302>
7. Johnson A.D., Cheng F., Tsai Y., Shih C.K. Giant Enhancement of Defect-Bound Exciton Luminescence and Suppression of Band-Edge Luminescence in Monolayer WSe₂-Ag Plasmonic Hybrid Structures. *Nano Lett.* 2017;17(7):4317–4322. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b01364>
8. Butun S., Tongay S., Aydin K. Enhanced Light Emission from Large-Area Monolayer MoS₂ Using Plasmonic Nanodisc Arrays. *Nano Lett.* 2015;15(4):2700–2704. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00407>
9. Su H., Wu S., Yang Y., Leng Q., Huang L., Fu J., Wang Q., Liu H., Zhou L. Surface Plasmon Polariton-Enhanced Photoluminescence of Monolayer MoS₂ on Suspended Periodic Metallic Structures. *Nanophotonics*. 2020;10(2):975. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0545>
10. Miao J., Hu W., Jing Y., Luo W., Liao L., Pan A., Wu S., Cheng J., Chen X., Lu W. Surface Plasmon-Enhanced Photodetection in Few Layer MoS₂ Phototransistors with Au Nanostructure Arrays. *Small*. 2015;11(20):2392–2398. <https://doi.org/10.1002/smll.201403422>
11. Xu H. Enhanced Light–Matter Interaction of a MoS₂ Monolayer with a Gold Mirror Layer. *RSC Adv.* 2017;7(37):23109–23113. <https://doi.org/10.1039/C6RA27691A>

12. Guo J., Li S., He Z., et al. Near-Infrared Photodetector Based on Few-Layer MoS₂ with Sensitivity Enhanced by Localized Surface Plasmon Resonance. *Appl. Surf. Sci.* 2019;483:1037–1043. <https://doi.org/10.1016%2Fj.apusc.2019.04.044>
13. Li Y., DiStefano J.G., Murthy A.A., Cain J.D., et. al. Superior Plasmonic Photodetectors Based on Au@MoS₂ Core–Shell Heterostructures. *ACS Nano*. 2017;11(10):10321–10329. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05071>
14. Kats M.A., Genevet P., Aoust G., et. al. Giant Birefringence in Optical Antenna Arrays with Widely Tailorable Optical Anisotropy. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2012;109(31):12364–12368. <http://doi.org/10.1073/pnas.1210686109>
15. Ross M.B., Blaber M.G., Schatz G.C. Using Nanoscale and Mesoscale Anisotropy to Engineer the Optical Response of Three-Dimensional Plasmonic Metamaterials. *Nat. Commun.* 2014;5(1):4090. <https://doi.org/10.1038/ncomms5090>
16. Li H.-J., Ren Y.-Z., Hu J.-G., Qin M., Wang L.-L. Wavelength-Selective Wide-Angle Light Absorption Enhancement in Monolayers of Transition-Metal Dichalcogenides. *J. Light. Technol.* 2018;36(16):3236–3241. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2840847>
17. Bahauddin S.M., Robatjazi H., Thomann I. Broadband Absorption Engineering to Enhance Light Absorption in Monolayer MoS₂. *ACS Photonics*. 2016;3(5):853–862. <http://doi.org/10.1021/acsp Photonics.6b00081>
18. Ouyang Q., Zeng S., Dinh X.-Q., Coquet P., Yong K.-T. Sensitivity Enhancement of MoS₂ Nanosheet Based Surface Plasmon Resonance Biosensor. *Procedia Eng.* 2016;140:134–139. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1114>
19. Ouyang Q., Zeng S., Jiang L., et al. Sensitivity Enhancement of Transition Metal Dichalcogenides/Silicon Nanostructure-Based Surface Plasmon Resonance Biosensor. *Sci. Rep.* 2016;6(1):28190. <https://doi.org/10.1038/srep28190>
20. Oumekloul Z., Zeng S., Achoui Y., Mir A., Akjouj A. Multi-Layer MoS₂-Based Plasmonic Gold Nanowires at Near-Perfect Absorption for Energy Harvesting. *Plasmonics*. 2021;16(5):1613–1621. <https://doi.org/10.1007/s11468-021-01405-w>
21. Furchi M.M., Polyushkin D.K., Pospischil A., Mueller T. Mechanisms of Photoconductivity in Atomically Thin MoS₂. *Nano Lett.* 2014;14(11):6165–6170. <https://doi.org/10.1021/nl502339q>
22. Di Bartolomeo A., Genovese L., Foller T., et al. Electrical Transport and Persistent Photoconductivity in Monolayer MoS₂ Phototransistors. *Nanotechnology*. 2017;28(11):214002. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa6d98>
23. Huang Y., Zhuge F., Hou J., et al. Van Der Waals Coupled Organic Molecules with Monolayer MoS₂ for Fast Response Photodetectors with Gate-Tunable Responsivity. *ACS Nano*. 2018;12(4):4062–4073. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b02380>
24. Liu Y., Zhang H., Geng Y., et al. Long-Range Surface Plasmon Resonance Configuration for Enhancing SERS with an Adjustable Refractive Index Sample Buffer to Maintain the Symmetry Condition. *ACS Omega*. 2020;5(51):32951–32958. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03923>
25. Borah R., Smets J., Ninakanti R., et al. Self-Assembled Ligand-Capped Plasmonic Au Nanoparticle Films in the Kretschmann Configuration for Sensing of Volatile Organic Compounds. *ACS Appl. Nano Mater.* 2022;5(8):11494–11505. <http://doi.org/10.1021/acsnm.2c02524>
26. Jamil N.A., Menon P.S., Said F.A., et al. Graphene-Based Surface Plasmon Resonance Urea Biosensor Using Kretschmann Configuration. In: *2017 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*. IEEE; 2017. P. 112–115. <https://doi.org/10.1109/RSM.2017.8069122>
27. Shukla N., Chetri P., Boruah R., Gogoi A., Ahmed G.A. Surface Plasmon Resonance Biosensors Based on Kretschmann Configuration: Basic Instrumentation and Applications. In: Biswas R., Mazumder N. (Eds.). *Recent Advances in Plasmonic Probes. Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology*. 2022. V. 33. P. 191–222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99491-4_6
28. Rodrigues E.P., Lima A.M.N., Oliveira L.C., et al. Surface Plasmon Resonance Features of Corrugated Copper and Gold Films: Grating Mode Operation with Wavelength Interrogation. In: *2017 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*. IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/INSCIT.2017.8103505>
29. Maheswari P., Ravi V., Rajesh K.B., Rajan Jha. High Performance Bimetallic(Cu-Co) Surface Plasmon Resonance Sensor Using Hybrid Configuration of 2D Materials. *J. Environ. Nanotechnol.* 2022;11(3):01–10. <https://doi.org/10.13074/jent.2022.09.223455>
30. West P.R., Ishii S., Naik G.V., Emani N.K., Shalae V.M., Boltasseva A. Searching for Better Plasmonic Materials. *Laser Photon. Rev.* 2010;4(6):795–808. <https://doi.org/10.1002/lpor.200900055>
31. Rycenga M., Cobley C.M., Zeng J., et al. Controlling the Synthesis and Assembly of Silver Nanostructures for Plasmonic Applications. *Chem. Rev.* 2011;111(6):3669–3712. <https://doi.org/10.1021/cr100275d>
32. Amendola V., Bakr O.M., Stellacci F. A Study of the Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles by the Discrete Dipole Approximation Method: Effect of Shape, Size, Structure, and Assembly. *Plasmonics*. 2010;5(1):85–97. <http://doi.org/10.1007/s11468-009-9120-4>
33. Rakić A.D., Djurić A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. Optical Properties of Metallic Films for Vertical-Cavity Optoelectronic Devices. *Appl. Opt.* 1998;37(22):5271. <https://doi.org/10.1364/ao.37.005271>
34. Gu H., Song B., Fang M., et al. Layer-Dependent Dielectric and Optical Properties of Centimeter-Scale 2D WSe₂: Evolution from a Single Layer to Few Layers. *Nanoscale*. 2019;11(47):22762–22771. <http://doi.org/10.1039/C9NR04270A>
35. Leong H.-S., Guo J., Lindquist R.G., Liu Q.H. Surface Plasmon Resonance in Nanostructured Metal Films under the Kretschmann Configuration. *J. Appl. Phys.* 2009;106(12):124314–124314-5. <http://doi.org/10.1063/1.3273359>

Об авторах

Гуськов Андрей Александрович, стажер-исследователь, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: guskov@mirea.ru. Scopus Author ID 57225969940, ResearcherID AAE-2479-2022, SPIN-код РИНЦ 8000-3575, <https://orcid.org/0000-0002-8462-5811>

Безвиконный Никита Владиславович, стажер-исследователь, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bezvikonnyj@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2222-4307>

Лавров Сергей Дмитриевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра нанoeлектроники, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lavrov_s@mirea.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, SPIN-код РИНЦ 5918-8994, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>

About the authors

Andrey A. Guskov, Research Intern, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: guskov@mirea.ru. Scopus Author ID 57225969940, ResearcherID AAE-2479-2022, RSCI SPIN-code 8000-3575, <https://orcid.org/0000-0002-8462-5811>

Nikita V. Bezvikonnyi, Research Intern, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bezvikonnyj@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2222-4307>

Sergey D. Lavrov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lavrov_s@mirea.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, RSCI SPIN-code 5918-8994, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>