

Научная статья

УДК.621.315.592+621.383.522

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19102>

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИОДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СИЛИЦИДА МАГНИЯ

Д. В. Фомин¹, И. О. Шолыгин¹, А. В. Поляков¹ □,
Н. Г. Галкин², К. Н. Галкин², И. М. Чернев²

¹ Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия;

² Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,
г. Владивосток, Россия

□ polyakov_a_1999@mail.ru

Аннотация. В работе синтезирован и изучен непрямозонный полупроводник Mg_2Si , сформированный в виде поликристаллической пленки толщиной 682 нм. Силицидообразование установлено методами комбинационного рассеяния света и ИК-Фурье спектроскопии. С помощью рентгенофазового анализа определено преобладание в образце кристаллографического направления Mg_2Si (220). На основе измерений эффекта Холла был доказан электронный тип проводимости пленки. Из пленки были изготовлены фотодиодные структуры с $p-n$ -переходами $Al/Mg_2Si/Si-n/Au-Sb$ и $Au/Mg_2Si/Si-n/Au-Sb$. Измерены и проанализированы их вольтамперные характеристики. Установлены зависимости фотоотклика структур от длины волны излучения, знака и величины приложенного потенциала; выявлены их особенности. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что при высокотемпературном отжиге кремния в нем формируется двойной $p-n$ -переход с запирающим слоем, который вместе с гетеропереходом $Mg_2Si/Si-p$ определяет уникальные фотоспектральные характеристики.

Ключевые слова: силицид магния, фотодиодная гетероструктура, $p-n$ -переход, локальный фотоотклик, фотоспектральная характеристика

Финансирование: Работы по формированию пленок Mg_2Si на кремнии выполнены при финансовой поддержке внутреннего гранта Амурского государственного университета (г. Благовещенск) на 2024 – 2025 гг. Исследования оптических, фононных и диодных характеристик гетероструктур проведены в рамках Государственного задания Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток (госбюджетная тема FWW-2026-0007).

Для цитирования: Фомин Д. В., Шолыгин И. О., Поляков А. В., Галкин Н. Г., Галкин К. Н., Чернев И. М. Фотоэлектрические свойства диодов на основе полупроводникового силицида магния // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 1. С. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19102>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article


DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19102>

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF DIODES BASED ON MAGNESIUM SILICIDE SEMICONDUCTOR

D. V. Fomin¹, I. O. Sholygin¹, A. V. Polyakov¹ ,
N. G. Galkin², K. N. Galkin², I. M. Chernev²

¹Amur State University, Blagoveshchensk, Russia;

²Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

 polyakov_a_1999@mail.ru

Abstract. In this work, an indirect-gap semiconductor Mg_2Si has been synthesized and studied. Mg_2Si was formed as a 682 nm thick polycrystalline film (the formation was established using Raman scattering and Fourier-transform IR spectroscopies). X-ray phase analysis revealed that the Mg_2Si (220) crystallographic direction in the sample was predominant. Based on the Hall effect measurements, the electronic type of the film conductivity was proven. Photodiode structures with Al/ Mg_2Si /Si-*n*/Au-Sb and Au/ Mg_2Si /Si-*n*/Au-Sb *p-n* junctions were made from the film. Their current-voltage characteristics were measured and analyzed. The dependences of the structure photoresponse on the radiation wavelength, the sign and magnitude of the applied potential were established, and their features were identified. An analysis of the obtained experimental data showed that a double *p-n* junction with a barrier layer was forming in the high-temperature annealing of silicon. This junction, together with the Mg_2Si /Si-*p* heterojunction, determined the unique photospectral characteristics of the system.

Keywords: magnesium silicide, photodiode heterostructure, *p-n* junction, local photoresponse, photospectral characteristic

Funding: The work on forming Mg_2Si films on silicon was carried out with the financial support of an internal grant of Amur State University (Blagoveshchensk) for 2024–2025. Studies of optical, phonon and diode characteristics of heterostructures were carried out within the framework of a State Assignment for the Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok (state budget topic FFWF-2026-0007).

For citation: Fomin D. V., Sholygin I. O., Polyakov A. V., Galkin N. G., Galkin K. N., Chernev I. M., Photoelectric properties of diodes based on magnesium silicide semiconductor, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 19 (1) (2026) 19–29. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19102>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Силициды с полупроводниковыми свойствами вызывают все возрастающий интерес у научного сообщества как многообещающие материалы для микро- и наноэлектроники [1, 2]. К ним относится, в частности, непрямозонный полупроводник Mg_2Si с шириной запрещенной зоны 0,77 эВ [3, 4]. Этот силицид имеет более высокую фоточувствительность в инфракрасной области, по сравнению с монокристаллическим кремнием [3 – 6]. Оптические и электронные свойства силицида магния позволяют рассматривать его как перспективный материал для оптоэлектронных и термоэлектрических приборов. Однако, несмотря на распространенность исходных материалов, создание приборных структур на основе соединений магния с кремнием пока ограничивается лабораторными прототипами. Это связано со сложностью эпитаксиального роста пленок силицида на подложках кремния и высоким коэффициентом десорбции атомов магния с поверхности подложек [5, 6]. Скорость десорбции этих атомов растет с повышением температуры прогрева подложки сверх 250°C, а также при скоростях осаждения магния до 10 нм/мин, что приводит к отсутствию силицидообразования [7, 8].

Большая часть пленок Mg_2Si , выращенных на монокристаллических подложках кремния и описанных в литературе, состоит, как правило, из разориентированных зерен и имеет поликристаллическую структуру [9, 10]. Множественные границы раздела между зернами приводят к рассеянию фотосгенерированных носителей заряда и ухудшению электрических свойств пленки [8]. В настоящее время идет поиск эффективного метода, который позволял бы получать на подложках кремния пленки Mg_2Si высокого кристаллического качества, важные для изготовления приборных структур.

В данной работе рассматриваются свойства и характеристики фотодиодов на основе структур $Au/Mg_2Si/Si/Au-Sb$ и $Al/Mg_2Si/Si/Au-Sb$, сформированных из пленки силицида магния Mg_2Si (толщина 682 нм).

Экспериментальная часть

Условия формирования пленки силицида магния. Формирование пленки указанного состава проводилось методом реактивной эпитаксии в сверхвысоковакуумной камере Varian прибора РНІ-590 с базовым давлением 10^{-7} Па. Подложка была вырезана из полупроводниковой пластины кремния Si (111) типа КЭФ, с удельным сопротивлением 2 – 15 Ом·см. После высокотемпературного отжига подложки при $1150^\circ C$ на нее был осажден слой аморфного кремния толщиной 60 нм (при комнатной температуре). Далее на атомарно-чистую поверхность полученного слоя поочередно трижды осаждались парно слои магния и кремния. Соотношение толщины слоев Mg/Si было выбрано 3:1. Такой выбор был обусловлен высокой степенью десорбции магния с поверхности подложки при скорости осаждения менее 10 нм/мин и температуре прогрева подложки свыше $200^\circ C$ [7, 8].

Выращивание пленки выполняли при следующих условиях:

- скорость осаждения магния 9,4 нм/мин,
- скорость осаждения кремния 1,1 нм/мин,
- температура кремниевой подложки $250^\circ C$ (во время формирования слоев).

В результате была получена пленка толщиной 682 нм.

Оптические свойства пленки. Для подтверждения силицидообразования в пленке, ее исследовали методами комбинационного рассеяния света (КРС) и инфракрасной-Фурье-спектроскопии (ИКФС) на спектрометре NTEGRA SPECTRA II (NT-MDT) и Фурье-спектрофотометре Vertex 80v (Bruker). Спектры КРС и ИКФС пропускания приведены на рис. 1. Видно, что на спектре КРС наблюдаются пики при значениях 259 и 349 см^{-1} . Эти фоновые моды F_{2g} и LO, согласно данным статей [11, 12], соответствуют силициду магния Mg_2Si .

Спектральные позиции фоновых мод на рис. 1, а отличаются от таковых, известных для монокристаллического Mg_2Si [13] и для пленки, выращенной методом сверхбыстрой эпитаксии [8] (табл. 1).

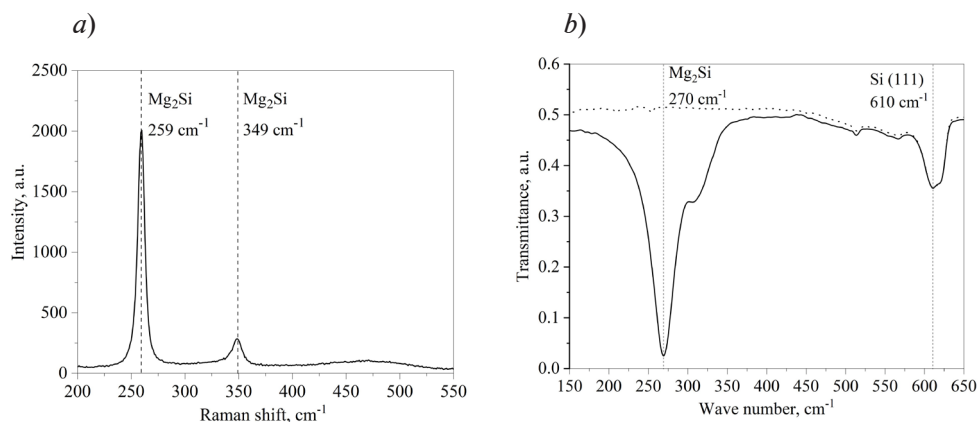


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) (а) и инфракрасной Фурье-спектроскопии (ИКФС) пропускания (b) синтезированной пленки силицида магния толщиной 682 нм. Температура подложки $250^\circ C$ (ее спектр ИКФС представлен точечной кривой)

Таблица 1

Сравнение полученного спектра КРС пленки Mg_2Si с литературными данными

Фононная мода	Значение рамановского сдвига, cm^{-1}		
	В нашей работе	[8] (метод сверхбыстрой эпитаксии)	[13] (монокристалл)
F_{2g}	259	257	258,5
LO	349	346	360,0

Видно, что для изготовленной нами пленки в спектре КРС наблюдается сдвиг в меньшую сторону волновых чисел для фононной моды LO, по сравнению с монокристаллом; предположительно это может указывать на наличие структурных дефектов в пленке Mg_2Si , а также на сжимающие напряжения внутри нее. Для пленки, полученной методом сверхбыстрой эпитаксии, напротив, наблюдается сдвиг в большую сторону волновых чисел. Различия выражены не так резко, как для монокристаллического Mg_2Si . Причиной этого, скорее всего, является различие в циклах нагрева-охлаждения.

На ИКФС-спектре пропускания пленки (рис. 1, б) наблюдается пик поглощения большой интенсивности со значением 270 см^{-1} , который, по литературным данным [14, 15], свидетельствует об образовании Mg_2Si в составе сформированного образца. Пик поглощения при значении 610 см^{-1} относится к подложке Si (111), на которой была сформирована пленка.

Структурные свойства пленки. Эти свойства были исследованы методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker). Рентгеновский спектр объекта представлен на рис. 2. На спектре видны максимумы при значениях $2\Theta = 24,27^\circ$ и $40,13^\circ$, которые, согласно данным статей [8, 16 – 18], указывают на наличие в пленке кристаллических фаз Mg_2Si (111) и Mg_2Si (220) соответственно. Также в спектре наблюдаются пики при $2\Theta = 47,43^\circ$ и $58,09^\circ$, принадлежащие фазам Mg_2Si (311) и Mg_2Si (400) соответственно. Наибольшую интенсивность имеет пик при $2\Theta = 40,13^\circ$, что свидетельствует о преобладающем росте Mg_2Si вдоль кристаллографического направления (220).

В табл. 2 представлены результаты расчета межплоскостных расстояний и периода кристаллической решетки по данным рентгеновской дифракции.

Факт обнаружения на спектрах рентгеновской дифракции множественных рефлексов от разных кристаллографических плоскостей указывает на поликристаллическую структуру изготовленной пленки Mg_2Si . Поликристаллические пленки, как правило,

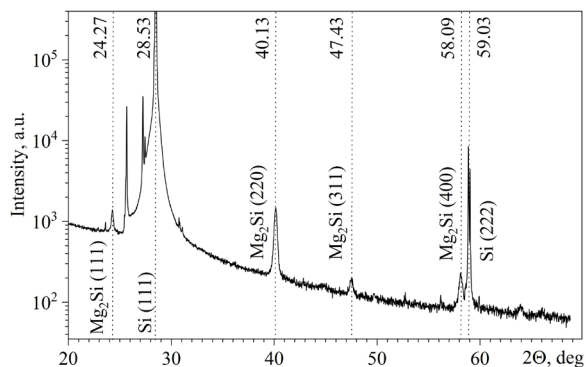


Рис. 2. Спектр рентгеновской дифракции пленки Mg_2Si толщиной 682 нм на подложке КЭФ Si (111) с удельным сопротивлением $2 - 15\text{ Ом}\cdot\text{см}$

Таблица 2

Результаты расчета межплоскостных расстояний d и периода решетки a пленки Mg_2Si по полученным данным рентгеновской дифракции

2Θ , град	Фаза	d , Å	a , Å
24,27	Mg_2Si (111)	3,6629	6,3443
40,13	Mg_2Si (220)	2,2443	6,3479
47,43	Mg_2Si (311)	1,9145	6,3498
58,09	Mg_2Si (400)	1,5860	6,3440

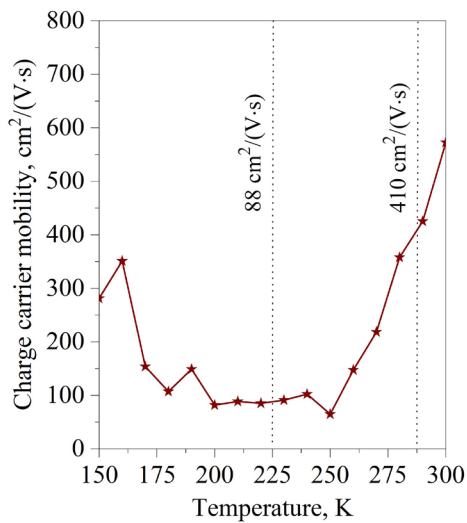


Рис. 3. График температурной зависимости подвижности носителей заряда в структуре Mg_2Si/Si (толщина пленки 682 нм). Индукция магнитного поля на образце 1,8 Тл

было установлено, что пленка при комнатной температуре обладает электронным типом проводимости. Скорее всего, это обусловлено диффузией легирующей примеси — фосфора для полупроводниковой шайбы КЭФ Si (111) — из подложки в пленку Mg_2Si .

Изготовление фотодиодов. Для создания фотодиодов Шоттки со структурами $Au/Mg_2Si/Si/Au-Sb$ и $Al/Mg_2Si/Si/Au-Sb$, поверхность сформированной пленки (лицевая сторона) были осаждены контакты из алюминия Al и золота Au толщиной по 100 нм каждый. На обратной стороне подложки для создания омического контакта необходимо было сформировать слой n^+-Si в слаболегированном кремнии. С этой целью был осажден слой сурьмы Sb толщиной 25 нм, после чего был осажден еще один слой золота толщиной 75 нм. Осаждение контактов было выполнено методом электронно-лучевого испарения; их отжиг — при температуре $350^\circ C$. Структурная схема полученных фотодиодов приведена на рис. 4

При условиях, аналогичных описанным в настоящей статье, формирование и изучение свойств контакта Si/Au-Sb было осуществлено в работе [8], где в качестве подложки была использована высокорезистивная полупроводниковая пластина Si (111) с удельным сопротивлением 1 кОм·см. Таким образом нам было известно, что контакт Si/Au-Sb не образует выпрямляющего барьера Шоттки.

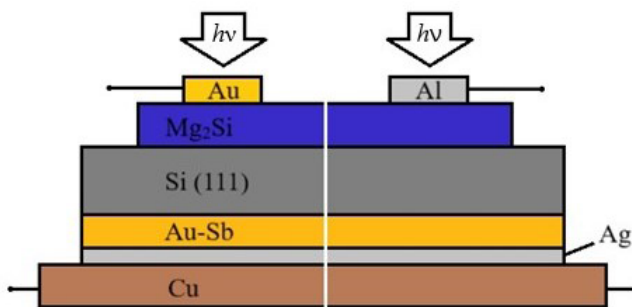


Рис. 4. Структурная схема фотодиодов, изготовленных на основе пленки Mg_2Si (стрелки указывают направление падающих фотонов)

характеризуются внутренними структурными напряжениями, поскольку они состоят из нанокристаллов, ориентированных беспорядочным образом. Также полученные результаты говорят о наличии в пленке высокой концентрации структурных дефектов, что неизбежно приводит к ухудшению электрических свойств [9, 11]. Анализ спектров рентгеновской дифракции позволяет предвидеть неутешительно низкие результаты для характеристик изготовленных диодных структур на основе такой пленки, по сравнению с обычным $p-n$ -фотодиодом на основе монокристаллического кремния [15].

Подвижность носителей заряда в пленке. Расчет указанной подвижности был проведен на основе данных измерений эффекта Холла четырехзондовым методом ван дер Пау. Полученный график зависимости подвижности носителей заряда от температуры показан на рис. 3.

В соответствии с полученными результатами было установлено, что пленка при комнатной температуре обладает электронным типом проводимости. Скорее всего, это обусловлено диффузией легирующей примеси — фосфора для полупроводниковой шайбы КЭФ Si (111) — из подложки в пленку Mg_2Si .

Образец помещали на изолированную контактную площадку для дальнейшего включения фотодиодов в измерительную цепь. Контакт между слоем Au-Sb и медной площадкой был получен с помощью проводящей пасты на основе порошка серебра Ag. Включение контактов на лицевой стороне было реализовано с использованием зажимов.

Вольтамперные характеристики фотодиодов. Вольтамперные характеристики (ВАХ) измеряли без засветки внешним излучением, в прямой (положительный полюс на контактах пленки) и обратной (положительный полюс на контакте Au-Sb) конфигурациях включения.

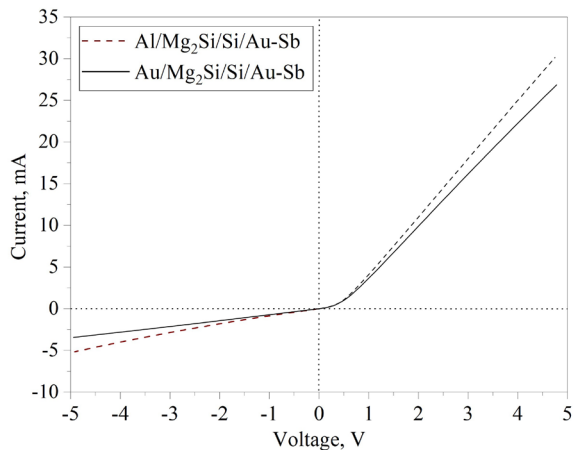


Рис. 5. Вольтамперные характеристики структур Al/Mg₂Si/Si-*n*/Au-Sb и Au/Mg₂Si/Si-*n*/Au-Sb (толщина пленки 682 нм)

Подобный вид ВАХ для исследованных структур не характерен для диодов с обычным *p-n*-переходом [19]. Наиболее вероятно, что контакты металл-Mg₂Si образовывали выпрямляющий барьер Шоттки.

Исследование фотоотклика фотодиода. Фотоспектральные характеристики были измерены на оптическом стенде, где образец освещался монохроматическим излучением в диапазоне от 420 до 1400 нм, с шагом в 2 нм. При этом стенд был изолирован от засветки внешним излучением. Зависимости фотоотклика от длины падающей волны представлены на рис. 6.

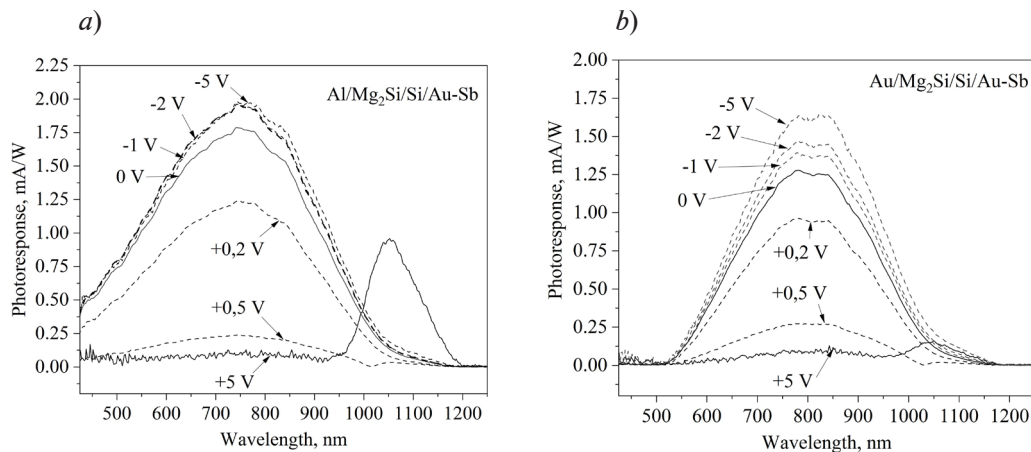


Рис. 6. Графики спектральных фотооткликов для структур Al/Mg₂Si/Si-*n*/Au-Sb (a) и Au/Mg₂Si/Si-*n*/Au-Sb (b). Толщина пленки Mg₂Si – 682 нм

В случае прямого включения диода (положительный полюс на контактах пленки) и приложенном потенциале +0,2 В, для структуры с алюминиевым контактом фотоотклик наблюдался в диапазоне длин волн от 450 до 1050 нм, для диода с золотым контактом – в диапазоне от 550 до 1050 нм. На длинах волн от 1100 нм и более фотоотклик не наблюдался. При повышении приложенного потенциала до +0,5 В, на кривых фотоотклика для обоих контактов начинали появляться локальные пики с положением максимума 1050 нм. Максимумы этого пика наблюдались при потенциале +5 В, причем его интенсивность была значительно выше для контакта Al. Пик фотоотклика характеризуется сдвигом в ИК-область, по сравнению с соответствующими кривыми для существующих кремниевых *p-n*-фотодиодов [15]. Значения интенсивности фотоотклика, полученные в нашей работе при прямом включении, значительно ниже таковых, по сравнению с обычным



p-n-фотодиодом на основе монокристаллического кремния [15]. Это связано, в первую очередь, с активной рекомбинацией носителей заряда на дефектах пленки Mg_2Si .

В случае обратного включения при потенциалах от -1 до -5 В, наблюдался только одиночный пик, который для алюминиевого контакта лежал в диапазоне от 450 до 1050 нм. Что же касается золотого контакта, то его коротковолновая граница была смещена влево и расположена в диапазоне от 550 до 1050 нм. Амплитуда данного пика практически не зависела от величины подаваемого потенциала. Уровень интенсивности пика был также выше для алюминиевого контакта. Разница в фотоотклике для двух указанных контактов связана с разными значениями работы выхода этих металлов. Так, работа выхода электронов из алюминия меньше, чем из золота: 4,25 и 4,70 эВ, соответственно.

Обсуждение результатов и основные выводы

Таким образом, в работе приведены результаты исследования пленки Mg_2Si толщиной 682 нм, сформированной на подложке Si (111). Измерены и проанализированы характеристики диодных структур, изготовленных на основе данной пленки.

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния обнаружены сдвиги 259 и 349 cm^{-1} (фононные моды F_{2g} и LO), что доказывает факт силицидообразования, в соответствии с данными статей [11, 12]. Дополнительно указанный факт был подтвержден методом инфракрасной Фурье-спектроскопии (в спектре наблюдался пик поглощения высокой интенсивности при значении волнового числа 270 cm^{-1} , который, по данным статей [14, 15], свидетельствовал об образовании Mg_2Si в составе пленки).

Методом рентгенофазового анализа установлено, что пленки содержат кристаллические фазы Mg_2Si (111) и Mg_2Si (220) при значениях $2\Theta = 24,27^\circ$ и $40,13^\circ$, соответственно [8, 16–18]. Также в пленке содержатся фазы Mg_2Si (311) и Mg_2Si (400) при $2\Theta = 47,43^\circ$ и $58,09^\circ$. Наибольшую интенсивность имеет рефлекс при $2\Theta = 40,13^\circ$, что свидетельствует о преобладающем росте пленки Mg_2Si вдоль кристаллографического направления (220). Из данных рентгенофазового анализа следует, что сформированная пленка имеет поликристаллическую структуру с высокой концентрацией дефектов.

На основе сформированной пленки были изготовлены два диода со структурами вида Al/ Mg_2Si /Si-*n*/Au-Sb и Au/ Mg_2Si /Si-*n*/Au-Sb. Из графиков их вольтамперных характеристик установлено, что работа диодов не соответствует режиму выпрямления стандартного *p-n*-перехода или диода Шоттки [17], что может быть следствием высокотемпературной (свыше 1000 °С) очистки в сверхвысоком вакууме.

Особенность такой технологии и привела к формированию в кремниевой подложке *p-n*-перехода, встроенного с двух сторон [20]. Легирующей примесью *p*-типа в данном случае выступили атомы бора, источником которых служили боросиликатные стекла в сверхвысоковакуумных камерах. Выделение атомов бора происходит преимущественно при дегазации камер при температурах 200 – 250 °С. В результате сформировались сложные гетероструктуры Al/ Mg_2Si /Si-*p*/Si-*n*/Si-*p*/Au-Sb и Au/ Mg_2Si /Si-*p*/Si-*n*/Si-*p*/Au-Sb со встречновключенными *p-n*-переходами и дополнительным гетеропереходом с силицидом магния Mg_2Si .

Такая структура проявляет уникальные фотоспектральные характеристики с локализованной полосой фотоотклика на длине волны 1050 нм и при положительном потенциале на алюминиевом и золотом контактах. Низкие, по сравнению с обычным *p-n*-фотодиодом на основе монокристаллического кремния [15], значения чувствительности обусловлены невысоким кристаллическим качеством сформированных пленок.

Полученные результаты будут использованы, прежде всего, для улучшения технологии формирования пленок Mg_2Si . Также просматривается возможность изготовления узкополосных инфракрасных фотодетекторов, работающих в диапазоне длин волн от 950 до 1200 нм. Исследования показали, что метод реактивной эпитаксии с низкими скоростями осаждения не вполне подходит для изготовления фотодетектирующих структур на основе пленок Mg_2Si . Для наилучшего кристаллического качества пленок силицида магния необходимо получать нанокристаллы Mg_2Si как можно больших размеров.

Предполагаемый путь улучшения технологии – это повышение скоростей осаждения магния и кремния либо уменьшение толщины выращиваемой пленки (отдельных ее слоев или их количества).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shevlyagin A. V., Pyaschenko V. M., Kuchmizhak A. A., Mitsai E. V., Amosov A. V., Balagan S. A., Kulnich S. A. Textured stainless steel as a platform for black Mg₂Si/Si heterojunction solar cells with advanced photovoltaic performance // *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 19. P. 6637.
2. Борисенко В. Е., Кривошеева А. В., Мигас Д. Б., Пушкарчук В. А., Филонов А. Б., Шапошников В. Л. Атомарная структура, фундаментальные электронные, оптические и магнитные свойства низкоразмерных структур из полупроводников // Доклады БГУИР (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). 2019. Т. 120. № 2. С. 73–84.
3. Yu H., Gao C., Zou J., Yang W., Xie Q. Simulation study on the effect of doping concentrations on the photodetection properties of Mg₂Si/Si heterojunction photodetector // *Photonics*. 2021. Vol. 8. No. 11. P. 509.
4. Yu H., Ji S., Luo X., Xie Q. Technology CAD (TCAD) simulations of Mg₂Si/Si heterojunction photodetector based on the thickness effect // *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 16. P. 5559.
5. Вигдорович Е. Н. Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 41–49.
6. Akiyama T., Hori N., Tanigawa S., Tsuya D., Udono H. Fabrication of Mg₂Si pn-junction photodiode with shallow mesa-structure and ring electrode // *JJAP Conference Proceedings, 2017: Asia-Pacific Conference on Semiconducting Silicides and Related Materials – Science and Technology Towards Sustainable Electronics (APAC Silicide 2016)*. July 16–18, 2016, Fukuoka, Japan. Session ID: 011102.
7. Gouralnik A. S., Shevlyagin A., Chernev I., Ustinov A. Yu., Gerasimenko A. V., Gutakovskii A. K. Synthesis of crystalline Mg₂Si films by ultrafast deposition of Mg on Si (111) and Si (001) at high temperatures. Mg/Si intermixing and reaction mechanisms // *Materials Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 258. 15 January. P. 123903.
8. Чернев И. М., Субботин Е. Ю., Аргунов Е. В., Козлов А. Г., Герасименко А. В., Галкин Н. Г., Поляков М. В., Волкова Л. С., Дудин А. А., Гуральник А. С. Пленка Mg₂Si на Si (111), полученная методом сверхбыстрого реактивного осаждения Mg: структура и термоэлектрические свойства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 3-1. С. 106–111 (статья на английском языке).
9. Shevlyagin A., Iyaschenko V., Kuchmizhak A., Mitsai E., Sergeev A., Gerasimenko A., Gutakovskii A. Mg₂Si is the new black: Introducing a black silicide with > 95 % average absorption at 200 – 1800 nm wavelengths // *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 602. 15 November. P. 154321.
10. Chernev I. M., Gouralnik A. S., Subbotin E. Yu., Galkin K. N., Kropachev O. V., Goroshko D., Goroshko O. A., Gerasimenko A. V., Lisenkov O. E., Galkin N. G. FeSi and CrSi₂ thin films as transparent conductive layers for VIS/SWIR sensitive Mg₂Si films grown of Si // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023. Vol. 87. No. 3 Suppl. Pp. S370–S374.
11. Kato T., Sago Y., Fujiwara H. Optoelectronic properties of Mg₂Si semiconducting layers with high absorption coefficients // *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 110. No. 6. P. 063723.
12. Baleva M., Zlateva G., Atanassov A., Abrashev M., Goranova E. A. Resonant Raman scattering in ion-beam-synthesized Mg₂Si in a silicon matrix // *Physical Review B*. 2005. Vol. 72. No. 11. P.115330.
13. Onari S., Cardona M. Resonant Raman scattering in the II–IV semiconductors Mg₂Si, Mg₂Ge, and Mg₂Sn // *Physical Review B*. 1976. Vol. 14. No. 8. Pp. 3520–3531.
14. Baleva M., Marinova M., Atanassov A. Infrared spectra of semiconducting silicides nanolayers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. Vol. 113. No. 1. P. 012043.
15. Шольгин И. О., Фомин Д. В., Галкин Н. Г., Галкин К. Н., Чернев И. М., Поляков А. В. Формирование и свойства фотодиодных структур Al/Mg₂Si/Si/Au–Sb // *Известия вузов. Физика*. 2025. Т. 68. № 3. С. 22–31.
16. Stathokostopoulos D., Teknetzi A., Tarani E., Karfaridis D., Chrissafis K., Hatzikraniotis E., Vourlias G. Synthesis and characterization of nanostructured Mg₂Si by pack cementation process // *Results in Materials*. 2022. Vol. 13. No. 1. P. 100252.
17. Конотопский Л. Е., Копылец И. А., Севрюкова В. А., Зубарев Е. Н., Кондратенко В. В. Особенности роста наноразмерных слоев Mg₂Si в многослойных рентгеновских зеркалах Si/Mg₂Si // *Журнал нано- и электронной физики*. 2016. Т. 8. № 2. С. 02021-1–02021-6.

18. Yu H., Deng R., Mo Z., Ji S., Xie Q. Fabrication and characterization of visible to near-infrared photodetector based on multilayer graphene/Mg₂Si/Si heterojunction // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. No. 18. P. 3230.
19. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ., 2-е изд. М.: Мир, 1984. 456 с.
20. Liehr M., Renier M., Wachnik R. A., Werner J., Scilla G. S., Ho P. S. Electrical properties of vacuum annealed Si surface // *Journal of Vacuum Science and Technology A*. 1987. Vol. 5. No. 4. Pp. 2131–2134.

REFERENCES

1. Shevlyagin A. V., П'yaschenko V. M., Kuchmizhak A. A., et al., Textured stainless steel as a platform for black Mg₂Si/Si heterojunction solar cells with advanced photovoltaic performance, *Materials*. 15 (19) (2022) 6637.
2. Borisenko V. E., Krivosheyeva A. V., Migas D. B., et al., Atomic structure, fundamental electronic, optical and magnetic properties of low-dimensional structures of semiconductors, *Doklady BGUIR*. (2) (2019) 73–84 (in Russian).
3. Yu H., Gao C., Zou J., et al., Simulation study on the effect of doping concentrations on the photodetection properties of Mg₂Si/Si heterojunction photodetector, *Photonics*. 8 (11) (2021) 509.
4. Yu H., Ji S., Luo X., Xie Q., Technology CAD (TCAD) simulations of Mg₂Si/Si heterojunction photodetector based on the thickness effect, *Sensors*. 21 (16) (2021) 5559.
5. Vigdorovich E. N., Radiation resistance of epitaxial structures based on GaAs, *Russian Technological Journal*. 7 (3) (2019) 41–49 (in Russian).
6. Akiyama T., Hori N., Tanigawa S., et al., Fabrication of Mg₂Si pn-junction photodiode with shallow mesa-structure and ring electrode, *JJAP Conf. Proc.*, 2017: Asia-Pacific Conf. on Semiconducting Silicides and Related Materials – Science and Technology Towards Sustainable Electronics (APAC Silicide 2016). July 16–18, 2016, Fukuoka, Japan. Sess. ID: 011102.
7. Gouralnik A. S., Shevlyagin A., Chernev I., et al., Synthesis of crystalline Mg₂Si films by ultrafast deposition of Mg on Si (111) and Si (001) at high temperatures. Mg/Si intermixing and reaction mechanisms, *Mater. Chem. Phys.* 258 (15 Jan) (2021) 123903.
8. Chernev I. M., Subbotin E. Yu., Argunov E. V., et al., Mg₂Si film on Si (111) prepared by Ultra-Fast Mg reactive deposition: Crystal structure and thermoelectric properties, *St. Petersburg State Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 16 (3.1) (2023) 106–111.
9. Shevlyagin A., Iiyaschenko V., Kuchmizhak A., Mg₂Si is the new black: Introducing a black silicide with > 95 % average absorption at 200–1800 nm wavelengths, *Appl. Surf. Sci.* 602 (15 Nov) (2022) 154321.
10. 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 of Si, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 87 (3 Suppl) (2023) S370–S374.
11. Kato T., Sago Y., Fujiwara H., Optoelectronic properties of Mg₂Si semiconducting layers with high absorption coefficients, *J. Appl. Phys.* 110 (6) (2011) 063723.
12. Baleva M., Zlateva G., Atanassov A., et al., Resonant Raman scattering in ion-beam-synthesized Mg₂Si in a silicon matrix, *Phys. Rev. B*. 72 (11) (2005) 115330.
13. Onari S., Cardona M., Resonant Raman scattering in the II–IV semiconductors Mg₂Si, Mg₂Ge, and Mg₂Sn, *Phys. Rev. B*. 14 (8) (1976) 3520–3531.
14. Baleva M., Marinova M., Atanassov A., Infrared spectra of semiconducting silicides nanolayers, *J. Phys. Conf. Ser.* 113 (1) (2008) 012043.
15. Sholygin I. O., Fomin D. V., Galkin N. G., et al., Formation and properties of Al/Mg₂Si/Si/Au–Sb photodiode structures, *Izvestiya vuzov. Fizika*. 68 (3) (2025) 22–31 (in Russian).
16. Stathokostopoulos D., Teknetzi A., Tarani E., et al., Synthesis and characterization of nanostructured Mg₂Si by pack cementation process, *Results Mater.* 13 (1) (2022) 100252.
17. Konotopskiy L. E., Kopylets I.A., Sevrykova V. A., et al., Features of Mg₂Si layer growth in Si/Mg₂Si multilayers, *J. Nano- & Electron. Phys.* 8 (2) (2016) 02021 (6 pp.) (in Russian).
18. Yu H., Deng R., Mo Z., et al., Fabrication and characterization of visible to near-infrared photodetector based on multilayer graphene/Mg₂Si/Si heterojunction, *Nanomater.* 12 (18) (2022) 3230.

19. Sze S. M., Physics of semiconductor devices, 2-nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1981.

20. Liehr M., Renier M., Wachnik R. A., et al., Electrical properties of vacuum annealed Si surface, J. Vac. Sci. Technol. A. 5 (4) (1987) 2131–2134.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФОМИН Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, заместитель директора по науке и инновациям Института компьютерных и инженерных наук Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Россия.

675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21

e-office@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-5474-5281

ШОЛЫГИН Илья Олегович – инженер кафедры физики Института компьютерных и инженерных наук Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Россия.

675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21

ilia.sholygin235@bk.ru

ORCID: 0009-0004-6651-1468

ПОЛЯКОВ Алексей Вячеславович – младший научный сотрудник кафедры физики Института компьютерных и инженерных наук Амурского государственного университета, г. Благовещенск, Россия.

675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21

polyakov_a_1999@mail.ru

ORCID: 0009-0009-5104-5966

ГАЛКИН Николай Геннадьевич – доктор физико-математических наук, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник лаборатории оптики и электрофизики Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Россия.

690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5

galkin@iacp.dvo.ru

ORCID: 0000-0003-4127-2988

ГАЛКИН Константин Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптики и электрофизики Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Россия.

690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5

galkinkn@iacp.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-5386-1013

ЧЕРНЕВ Игорь Михайлович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории оптики и электрофизики Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Россия.

690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5

igor_chernev7@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8726-9832

THE AUTHORS**FOMIN Dmitriy V.***Amur State University*

21 Ignatievskoe HWY, Blagoveshchensk, 675027, Russia

e-office@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-5474-5281

SHOLYGIN Ilya O.*Amur State University*

21 Ignatievskoe HWY, Blagoveshchensk, 675027, Russia

ilia.sholygin235@bk.ru

ORCID: 0009-0004-6651-1468

POLYAKOV Aleksey V.*Amur State University*

21 Ignatievskoe HWY, Blagoveshchensk, 675027, Russia

polyakov_a_1999@mail.ru

ORCID: 0009-0009-5104-5966

GALKIN Nikolay G.*Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.*

5 Radio St., Vladivostok, 690041, Russia

galkin@iacp.dvo.ru

ORCID: 0000-0003-4127-2988

GALKIN Konstantin N.*Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.*

5 Radio St., Vladivostok, 690041, Russia

galkinkn@iacp.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-5386-1013

CHERNEV Igor M.*Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.*

5 Radio St., Vladivostok, 690041, Russia

igor_chernev7@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8726-9832

*Статья поступила в редакцию 29.05.2025. Одобрена после рецензирования 29.10.2025.
Принята 29.10.2025.*

Received 29.05.2025. Approved after reviewing 29.10.2025. Accepted 29.10.2025.