

УДК 538.975 + 681.586 + 681.782.473
 EDN: OGUXNI

PACS: 10.1143



Силицид магния – перспективный материал для оптических датчиков

А. В. Поляков, Д. В. Фомин, Н. С. Новгородцев

Представлен результат анализа, на основе литературного обзора: структуры, оптических и электронных свойств Mg_2Si в объемном и низкоразмерном состояниях. Проведено сравнение свойств силицида магния в низкоразмерном состоянии со свойствами материалов, широко используемых в оптоэлектронике: GaAs, Si и Ge. Проанализированы современные методы формирования тонких пленок Mg_2Si . Из литературных данных установлено, что в условиях термодинамического равновесия объемный Mg_2Si имеет гранецентрированную кубическую решетку, а низкоразмерный – $^{2/3}\sqrt{3}$ -R30°. Благодаря своим оптическим и электронным свойствам тонкопленочный Mg_2Si является перспективным материалом для оптоэлектронных устройств. Так, он обладает коэффициентом поглощения падающего света, максимальное значение которого по современным данным составляет 96 %. Диапазон fotocувствительности Mg_2Si лежит в диапазоне от 200 до 2100 нм. Также из обзора было определено, что данный силицид является непрямозонным полупроводником: ширина запрещенной зоны которого находится в диапазоне от 0,6 до 0,8 эВ. В то же время наблюдаются прямые переходы, соответствующие энергии от 0,83 до 2,17 эВ. Подвижность электронов Mg_2Si в низкоразмерном состоянии составляет от 400 до 550 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$, а дырок – от 65 до 70 $см^2 \cdot В^{-1} \cdot с^{-1}$. Из рассмотренных данных установлено, что эффективность фотоэлектрического преобразования, для соединений на основе кремния с магнием, с оптимальной толщиной и примесным легированием, может достигать 10–12 % для p–n и n–p (Si/ Mg_2Si) и 22 % для p–n–p (Si/ Mg_2Si /Si) структур. По таким параметрам, как диапазон fotocувствительности и ширина запрещенной зоны, значения которых приведены выше, Mg_2Si в низкоразмерном состоянии превосходит GaAs, Si и Ge, а поэтому может считаться перспективным материалом для оптоэлектроники.

Ключевые слова: тонкие пленки, силицид магния, кремний, оптические датчики, структурный анализ, оптические свойства, электронные свойства, методы формирования.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-52-60

Введение

На сегодняшний день существует огромное количество приборов промышленной

электроники, многие из которых снабжены оптическими датчиками. Они используются, например, в системах гальванической развязки (на основе оптронов) или служат в качестве

 Поляков Алексей Вячеславович, м.н.с., магистрант.

E-mail: polyakov_a_1999@mail.ru

 Фомин Дмитрий Владимирович, директор центра,
 к.ф.-м.н., доцент.

E-mail: e-office@yandex.ru

Новгородцев Никита Сергеевич, магистрант.

E-mail: nnc19991999@gmail.com

 Амурский государственный университет.

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

Статья поступила в редакцию 3.02.2023

После доработки 14.02.2023

Принята к публикации 17.02.2023

© Поляков А. В., Фомин Д. В., Новгородцев Н. С., 2023

регистраторов внешних событий (оптические датчики) и в других целях.

Для удовлетворения возрастающих потребностей в широком спектре датчиков для оптоэлектроники, во всем мире ведется активный поиск новых эффективных материалов для их производства. В настоящее время наиболее распространенными материалами, для реализации этих целей, являются как одноэлементные вещества, например, Si и Ge, так и соединения на основе GaAs, а также силициды в виде тонких пленок [1]. Материалы на основе соединений металлов с кремнием в низкоразмерном состоянии обладают уникальными свойствами благодаря проявлению квантово-размерных эффектов. Также, такие материалы обладают, как правило, низкой стоимостью. Поэтому в лаборатории физики поверхности научно-образовательного центра имени К. Э. Циолковского АмГУ, в разное время осуществлялись и продолжают эксперименты по формированию и исследованию различных тонкопленочных силицидов: β – FeSi₂, Ca₂Si, Ca₃Si₄, BaSi₂ и Mg₂Si [2–4]. В настоящее время большой интерес у научного сообщества вызывают тонкие пленки Mg₂Si. Благодаря своим оптическим и электронным свойствам, силицид магния является перспективным материалом для датчиков оптоэлектронных устройств. Также это связано с тем, что магний и кремний не токсичны, не загрязняют окружающую среду и широко распространены на Земле. Именно поэтому целью данной статьи является проведение литературного обзора структуры, оптических и электронных свойств Mg₂Si в объемном и низкоразмерном состоянии; проведение сравнения низкоразмерного силицида магния с материалами, широко используемыми в оптоэлектронике (GaAs, Si и Ge); анализ методов формирования тонких пленок Mg₂Si. Данная работа является результатом анализа научных статей, большинство из которых опубликовано в российской и зарубежной печати за последние пять лет.

Структура силицида магния

Известно, что у объемного силицида магния гранецентрированная кубическая решетка

типа антифлюорит с пространственной группой $Fm\bar{3}m$ [5, 6]. В ГЦК решетке центры Si занимают углы и гранецентрированные позиции элементарной ячейки, а центры Mg занимают 8 тетраэдрических позиций внутри элементарной ячейки [6]. Значение постоянной решетки Mg₂Si находится в диапазоне от $6,338 \times 10^{-10}$ до $6,390 \times 10^{-10}$ м [7]. При этом величина периода кристаллической решетки была определена как теоретически, так и эмпирически: в первом случае – $6,382 \times 10^{-10}$ м [8], а во втором – $6,338 \times 10^{-10}$ м [7]. Параметры, полученные как теоретически, так и экспериментально, хорошо коррелируют между собой. Плотность силицида магния составляет 1988 кг/м^3 [5]. Координационные числа Si и Mg равны 8 и 4 соответственно. Mg заполняет тетраэдрические участки подрешетки Si. Соответственно, Mg тетраэдрически координируется 4 соседними атомами Si, а Si координируется 8 соседними атомами Mg. Модель ГЦК решетки силицида магния в объемном состоянии представлена на рис. 1 [6].

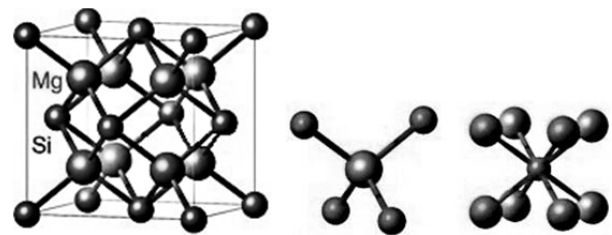


Рис. 1. Модель гранецентрированной кубической решетки Mg₂Si [6]

На структуру Mg₂Si в объемном состоянии может оказывать влияние давление. Современными методами моделирования, реализованными в алгоритме Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography установлено, что под давлением в диапазоне от 0 до 240 ГПа происходит смена структуры силицида магния: $Fm\bar{3}m \rightarrow Pnma \rightarrow P6_3/mmc \rightarrow C2/m \rightarrow Pmmm \rightarrow P2/m$.

Результаты представлены в табл. 1 [9]. Полученные данные согласуются с известными экспериментальными результатами.

Модели формы ячейки и расположения базисных атомов для объемных структур силицида магния различной симметрии, представленные в табл. 1, показаны на рис. 2.

Таблица 1

Структура объемного Mg_2Si в зависимости от величины давления

P , ГПа	Сингония	Пространственная группа	Номер группы
0,0–7,5	Кубическая	$Fm\bar{3}m$	225
7,5–21,3	Ромбическая	$Pnma$	62
21,3–34,0	Гексагональная	$P6_3/mmc$	194
34,0–76,0	Моноклинная	$C2/m$	12
76,0–235,0	Ромбическая	$Pmmm$	47
235,0–240,0	Моноклинная	$P2/m$	10

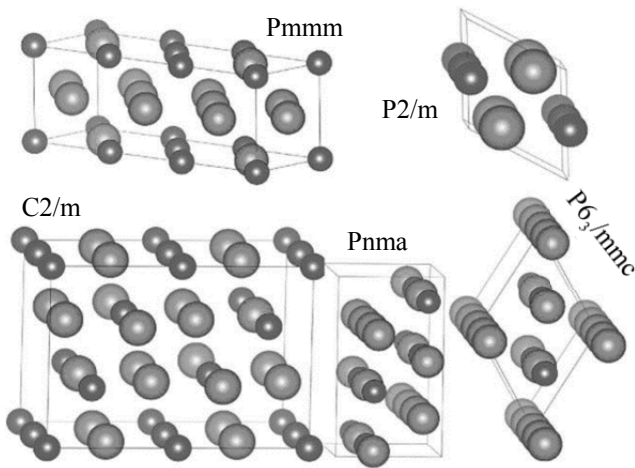


Рис. 2. Модели формы ячейки и расположения базисных атомов для объемных структур силицида магния различной симметрии [9]

Атомы Si обозначены маленькими темными кружками, атомы Mg – большими светлыми.

Таким образом, наиболее выгодной с точки зрения термодинамического равновесия и стабильной при давлениях менее 7,5 ГПа при нормальных условиях структурой объемного силицида магния является гранецентрированная кубическая решетка. В то же время данный материал обладает высокой температурой плавления, что отчетливо видно из фазовой диаграммы двойной системы Mg–Si (рис. 3). Следует отметить, что наиболее широко изучены как теоретически, так и эмпирически оптические и электронные свойства Mg_2Si именно с ГЦК решеткой. Данный силицид используется для формирования следующих гетероструктур: Si/ Mg_2Si , Mg_2Si /Si и Si/ Mg_2Si /Si [10–16].

В отличие от объемного силицида магния, тонкопленочный Mg_2Si в условиях термодинамического равновесия имеет другую кристаллическую структуру. По данным [15] она

представляет из себя $^{2/3}\sqrt{3}$ -R30°. Модель атомной решетки тонкой пленки Mg_2Si со структурой $^{2/3}\sqrt{3}$ -R30° на Si показана на рис. 4.

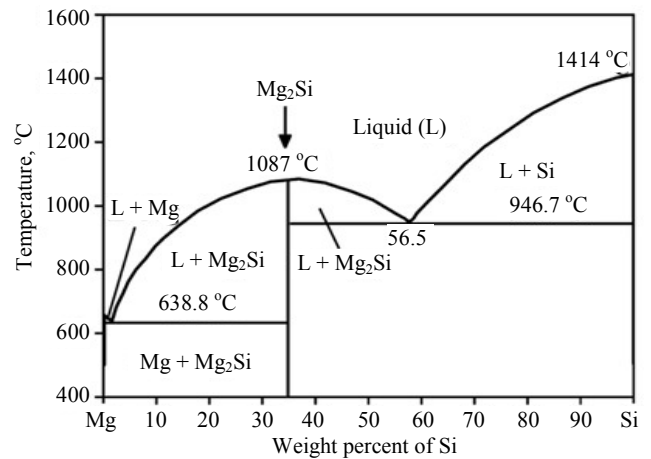


Рис. 3. Фазовая диаграмма двойной системы Mg–Si [10]

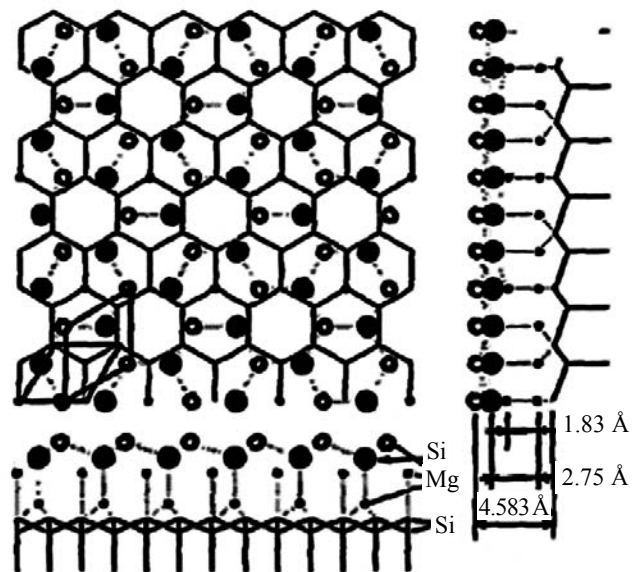


Рис. 4. Модель атомной решетки пленки Mg_2Si со структурой $^{2/3}\sqrt{3}$ -R30° на Si [15]

Оптические и электронные свойства тонкопленочного силицида магния

По литературным данным Mg_2Si в низкоразмерном состоянии обладает оптическими и электронными свойствами, более перспективными для оптических датчиков, по сравнению с объемным Mg_2Si и другими, широко используемыми в электронике, материалами: высокий коэффициент поглощения падающего света, широкий диапазон fotocувствительности, малая ширина запрещенной зоны и большая величина подвижности носителей заряда. Так, диапазон спектральной fotocувствительности низкоразмерного Mg_2Si шире, чем у GaAs, Si и Ge: для силицида магния он составляет от 200 до 2100 нм [14], для арсенида галлия – от 100 до 1000 нм, для кремния – от 190 до 1100 нм, а для германия – от 400 до 1700 нм [1].

В то же время низкоразмерный Mg_2Si уникален тем, что по сравнению с арсенидом галлия, кремнием и германием обладает очень высоким коэффициентом поглощения падающего света в широком спектральном диапазоне от 200 до 1800 нм. На сегодняшний день, по литературным данным, удалось достигнуть максимального коэффициента поглощения падающего света тонкопленочным Mg_2Si – 96 % [17], что очень важно для создания инфракрасных фотодетекторов нового поколения с повышенной энергоэффективностью.

Также исследователями, из публикаций, было экспериментально продемонстрировано, что гетероструктуры Mg_2Si/Si обладают фотолюминесценцией в ближнем инфракрасном (от 1100 до 1500 нм) и видимом (от 580 до 630 нм) спектрах. Длины волн излучения люминесценции силицида магния практически не зависят от температуры в диапазоне от 77 до 300 К. Интенсивность пиков постепенно уменьшается с повышением температуры. Максимальная интенсивность пика люминесценции наблюдается при 1342 нм (рис. 5). Эти факторы позволяют рассматривать систему гетеропереходов Mg_2Si/Si в качестве перспективного оптоэлектронного материала на основе Si [15, 16].

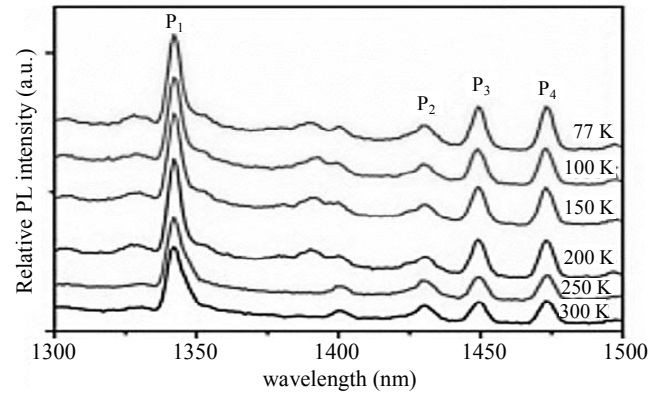


Рис. 5. Графики зависимости интенсивности пика люминесценции Mg_2Si/Si от длины волны [16]

Эмпирически в [8, 11–14] было установлено, что Mg_2Si является непрямозонным полупроводником: ширина запрещенной зоны находится в диапазоне от 0,6 до 0,8 эВ. В то же время наблюдаются прямые переходы, соответствующие энергии от 0,83 до 2,17 эВ. Также важно отметить, что ширина запрещенной зоны силицида магния уже, чем GaAs, Si и Ge, так для арсенида галлия – 1,43 эВ [18], для кремния – 1,12 эВ [11], для германия – 0,67 эВ [19]. Этот факт указывает на более высокое быстродействие оптических датчиков на основе Mg_2Si по сравнению с GaAs, Si и Ge. Это связано с тем, что с уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводника увеличивается количество рекомбинаций неравновесных носителей заряда.

В то же время теоретически была оценена ширина запрещенной зоны тонких пленок силицида магния, состоящих из одного, двух и трех 2D слоев, методом моделирования из первых принципов в рамках теории функционала плотности [20]. В результате была установлена стабильность двумерной структуры из одного 2D Mg_2Si -слоя в искаженной гексагональной фазе. Тонкие пленки силицида магния, имеющие более одного 2D слоя, стабилизируются в структуру, воспроизводящую объемную кубическую фазу Mg_2Si [21].

Рассчитанные этим методом зонные структуры данных пленок показаны на рис. 6.

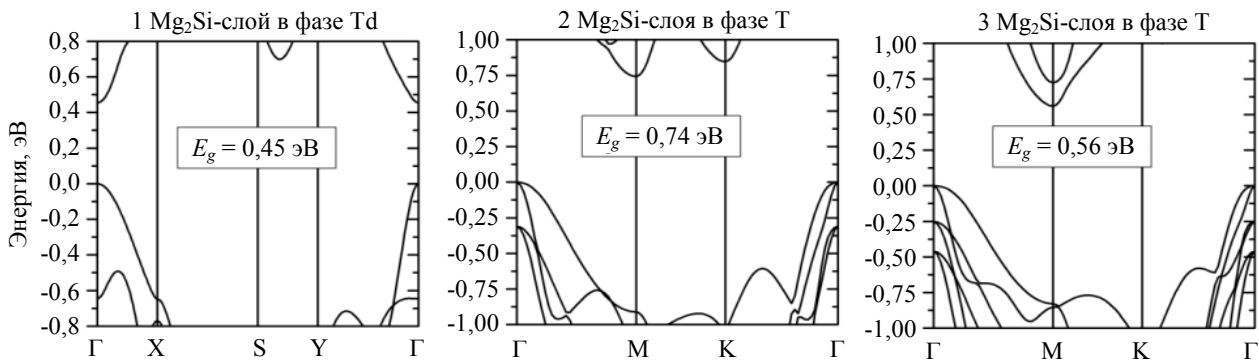


Рис. 6. Зонные структуры стабильных тонких пленок Mg_2Si , состоящих из одного, двух и трех 2D слоев (за нуль энергии приняты максимумы валентных зон) [21]

По результатам расчета электронных зонных структур, представленных на рис. 6, определено, что тонкая пленка Mg_2Si , состоящая из одного 2D слоя является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,45 эВ. Наличие прямого перехода может быть использовано в оптоэлектронике и подлежит дальнейшему изучению. Тонкие пленки силицида магния, состоящие из двух и трех 2D слоев, являются непрямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны 0,74 и 0,56 эВ соответственно [21]. Данные, полученные при теоретическом исследовании, после проверки экспериментами соответствуют в случае двух 2D Mg_2Si -слоев, и не соответствуют в случае одного и трех слоев.

Экспериментально была определена подвижность носителей заряда Mg_2Si : электронов – от 400 до 550 $cm^2/(V \cdot s)$, а дырок – от 65 до 70 $cm^2/(V \cdot s)$ [11, 22, 23]. Данные факты говорят о том, что силицид магния действительно обладает уникальными электронными свойствами, перспективными для оптических датчиков.

Анализ статей, содержащих информацию о приборных структурах на основе Mg_2Si в низкоразмерном состоянии, показал, что эффективность фотоэлектрического преобразования для структур с оптимальной толщиной и примесным легированием может достигать до 10–12 % для $p-n$ и $n-p$ (Si/Mg_2Si) и 22 % для $p-n-p$ ($Si/Mg_2Si/Si$) [11–15].

В табл. 2 на основе разных источников представлены оптические и электронные свойства арсенида галлия, кремния, германия и силицида магния.

Таблица 2

Оптические и электронные свойства GaAs, Si, Ge и Mg_2Si

Материал	Диапазон фоточувствительности, нм	Ширина запрещенной зоны, эВ
GaAs	100–1000	1,43
Si	190–1100	1,12
Ge	400–1700	0,67
Mg_2Si	200–2100	0,60–0,80

Наиболее широкий диапазон фоточувствительности, согласно представленной таблице, наблюдается у Mg_2Si , так же, как и наиболее узкая ширина запрещенной зоны.

Таким образом, из анализа табл. 2 и проведенного выше обзора оптических и электронных свойств различных материалов, используемых для оптических датчиков, можно заключить, что наиболее перспективным материалом является Mg_2Si в виде тонкой пленки, состоящей из двух 2D слоев. Высокий коэффициент поглощения, широкий диапазон фоточувствительности, фотопроводимость, а также малая ширина запрещенной зоны низкоразмерного Mg_2Si позволяют обеспечить более высокое быстродействие оптических датчиков на его основе по сравнению с GaAs, Si и Ge.

Методы формирования силицида магния в низкоразмерном состоянии

Постатейный анализ показал, что для формирования тонкопленочного Mg_2Si и его гетероструктур используют различные методы. Наиболее известные методы [15, 16, 24–26] сведены в табл. 3.

Таблица 3

Известные методы формирования тонких пленок Mg_2Si на Si (111)

№	Метод	Диапазон температур, °C	Скорость осаждения Mg, нм/с	Толщина пленки, нм
1	Магнетронное распыление	КТ	–	от 1000,00
2	Молекулярно-лучевая эпитаксия	250,00–300,00	–	до 1400,00
3	Импульсное осаждение магния	365,00–395,00	100,00	от 10,00
		387,00–477,00	1000,00	40,00–80,00
4	Твердофазная эпитаксия	180,00–250,00	0,04–0,16	60,00–150,00

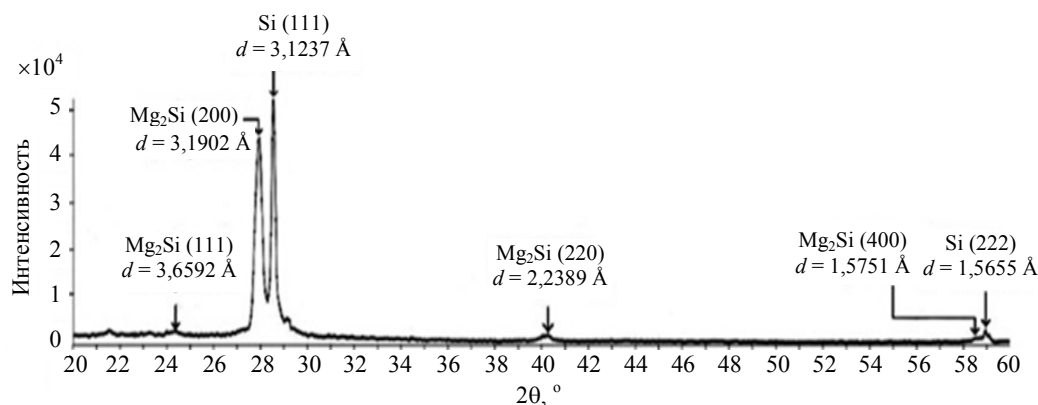
Для твердофазной эпитаксии (ТФЭ) данные в табл. 3 представлены по результатам экспериментов, выполненных в лаборатории физики поверхности научно-образовательного центра имени К. Э. Циолковского АмГУ.

Одним из эффективных методов формирования Mg_2Si является МЛЭ. Но такой метод является довольно затратным. Среди других методов, представленных в табл. 3, менее затратным является ТФЭ. Однако существует ряд трудностей при выполнении экспериментов, связанных с формированием тонких пленок Mg_2Si данным методом. К этим трудностям относится стабильное поддержание относительно низких температур (около 200 °C) разогрева образца. Это обусловлено низким коэффициентом конденсации и высоким давлением паров магния. В настоящее время ведётся отработка данной технологии формирования тонких пленок Mg_2Si . В связи с этим в лаборатории физики поверхности научно-образовательного центра АмГУ проводятся эксперименты по формированию тон-

копленочного силицида магния послойным осаждением Mg и Si, методом ТФЭ [26]. Так в результате одного из экспериментов была сформирована пленка Mg_2Si трехкратным послойным осаждением Mg и Si толщинами 20 и 10 нм соответственно при температуре прогрева кремниевой подложки $T_{п.} = 199,5$ °C в условиях сверхвысокого вакуума при $P = 10^{-7}$ Па. Относительно низкая температура подложки была достигнута путем использования прецизионного источника тока, позволяющего поддерживать в нагрузке стабильный ток в несколько мА. Перед этим был осуществлён комплекс мероприятий по калибровке температуры прогрева образцов с использованием термпары К-типа.

На рис. 7 представлена рентгенограмма, полученная от сформированной пленки.

Анализ представленной дифрактограммы показал, что пики при $2\theta = 24,3^\circ$; $27,9^\circ$; $40,2^\circ$ и $58,5^\circ$ свидетельствуют о наличии в составе сформированной пленки Mg_2Si .

Рис. 7. Рентгеновский спектр пленки Mg_2Si [27]

Заключение

Таким образом, по результатам анализа научных статей, посвященных исследованию оптических и электронных свойств силицида магния и методам формирования низкоразмерного Mg_2Si , можно сделать следующие выводы.

В результате проведения сравнительного анализа силицида магния в объемном и низкоразмерном состоянии установлено, что с точки зрения термодинамического равновесия объемный Mg_2Si имеет ГЦК решетку, а низкоразмерный – $2/3\sqrt{3}$ -R30°. Для тонкопленочного силицида магния коэффициент поглощения падающего света выше и составляет 96 %, диапазон fotocувствительности составляет от 200 до 2100 нм, а ширина запрещенной зоны находится в диапазоне от 0,6 до 0,8 эВ. Величина подвижности носителей заряда у низкоразмерного Mg_2Si составляет от 400 до $550 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ для электронов, а от 65 до $70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ – для дырок. По основным параметрам (диапазон fotocувствительности, ширина запрещенной зоны), значения которых были приведены ранее, Mg_2Si превосходит соответствующие параметры GaAs, Si и Ge. Исходя из этого, можно заключить, что Mg_2Si в низкоразмерном состоянии является наиболее перспективным материалом для оптических датчиков.

В результате анализа методов формирования низкоразмерного Mg_2Si выявлено, что в настоящее время для его получения используют следующие методы: магнетронное распыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, импульсное осаждение магния и твердофазная эпитаксия. Однако существует ряд трудностей при выполнении экспериментов, связанных с формированием тонких пленок Mg_2Si . Это обусловлено низким коэффициентом конденсации и высоким давлением паров магния. Поэтому продолжают работы по поиску недорогих и эффективных методов получения силицида магния в низкоразмерном состоянии. К таким методам можно отнести ТФЭ. Подтверждением этому является эксперимент, поставленный в лаборатории физики поверхности НОЦ АмГУ и данные РФА сформированного образца.

Статья подготовлена при поддержке
внутреннего гранта АмГУ.
Номер гранта № 2022/2023

ЛИТЕРАТУРА

1. Санько С. А., Каримбаев Д. Д., Жидик Ю. С. / Электронные средства и системы управления: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2020. С.103–106.
2. Горошко Д. Л., Фомин Д. В., Гуральник А. С., Галкин Н. Г. / Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11. № 3. С. 353–360.
3. Galkin N. G., Fomin D. V., Dubov V. L., Galkin K. N., Pyachin S. A., Burkov A. A. / Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum. 2018. Vol. 386. P. 48–54.
4. Galkin N. G., Goroshko D. L., Galkin K. N., Chusovitin E. A., Chusovitina S. V., Dubov V. L., Fomin D. V. / Japanese Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 59. № SF. P. SFFA11.
5. Ramirez D. C., Macario L. R., Cheng X., Kleinke H., Cino M., Walsh D., Tseng Y.-C. / ACS Applied Energy Materials. 2020. Vol. 3. № 3. P. 2130–2136.
6. Toriyama M. Y., Brod M. K., Snyder G. J. / ChemNanomat. 2022. Vol. 8. № 9.
7. Stathokostopoulos D., Teknetzi A., Tarani E., Karfaridis D., Chrissafis K., Hatzikraniotis E., Vourlias G. / Results in Materials. 2022. Vol. 13. № 1. P. 100252.
8. Шапошников В. Л., Кривошеева А. В., Борисенко В. Е. / Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2017. № 1. С. 73–81.
9. Луняков Ю. В. / Физика твердого тела. 2020. Т. 62. № 5. С. 783–787.
10. Seth P., Parkash O., Kumar D. / The royal society of chemistry. 2020. Vol. 10. P. 37327–37345.
11. Yu H., Gao C., Zou J., Yang W., Xie Q. / Photonics. 2021. Vol. 8. № 11. P. 509.
12. Yu H., Deng R., Mo Z., Ji S., Xie Q. / Nanomaterials. 2022. Vol. 12. № 18. P. 3230.
13. Onizawa Y., Akiyama T., Hori N., Esaka F., Udon H. / JJAP Conf. Proc. 2017. Vol. 5. P. 011101.
14. Akiyama T., Hori N., Tanigawa S., Tsuya D., Udon H. / JJAP Conf. Proc. 2017. Vol. 5. P. 011102.
15. Shevlyagin A., Chernev I., Galkin N. G., Gerasimenko A. V., Terai Y., Hoshida H., Nishikawa N., Ohdaira K., Gutakovskii A. / Solar Energy. 2020. Vol. 211. P. 383–395.
16. Liao Y.-F., Xie Q., Xiao Q.-Q., Chen Q., Fan M.-H., Xie J., Huang J., Zhang J.-M., Ma R., Wang S.-L., Wu H.-X., Fang D. / Applied Surface Science. 2017. Vol. 403. P. 302–307.
17. Shevlyagin A., Il'yaschenko V., Kuchmizhak A., Mitsai E., Sergeev A., Gerasimenko A. V., Gutakovskii A. / Applied Surface Science. 2022. Vol. 602.
18. Кирпичникова И. М., Хвостов Д. А., Тимин Н. В., Мужагитов Я. П. / Технический оппонент. 2018. № 1. С. 54–57.
19. Каплунов И. А., Рогалин В. Е. / Фотоника. 2019. Т. 13. № 1. С. 88–106.

20. Гусаков В. Е. / Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2015. Т. 59. № 1. С. 53–57.

21. Алексеев А. Ю., Кропачев О. В., Чернев И. М., Галкин К. Н. / Радиотехника и электроника: сб. тезисов докладов 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. – Минск, 2021. С. 97–99.

22. Исаченко Г. Н., Самунин А. Ю., Зайцев В. К., Гурьева Е. А., Константинов П. П. / Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 8. С. 1048–1051.

23. Исаченко Г. Н., Самунин А. Ю., Константинов П. П., Касьянов А. А., Масалимов А. М. / Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 5. С. 612–615.

24. Gouralnik A. S., Maslov A. M., Dotsenko S. A., Shevlyagin A. V., Chernev I. M., Ilyashenko V. M., Kitan S. A., Galkin K. N., Galkin N. G., Ustinov A. Y., Gerasimenko A. V., Koblova E. A. / Applied Surface Science. 2018. Vol. 439. P. 282–284.

25. Gouralnik A. S., Shevlyagin A. V., Chernev I. M., Ustinov A. Y., Gerasimenko A. V., Gutakovskii A. K. / Materials Chemistry and Physics. 2021. Vol. 258. P. 123903.

26. Fomin D. V., Astapov I. A., Polykov A. V. / Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials: Proceedings. – Vladivostok, 2022. P. 105–106.

PACS: 10.1143

Magnesium silicide is a promising material for optical sensors

A. V. Polyakov, D. V. Fomin and N. S. Novgorodtsev

Amur State University
21 Ignatyevskoe shosse, Blagoveshchensk, 675027, Russia
E-mail: polyakov_a_1999@mail.ru

Received 3.02.2023; revised 14.02.2023; accepted 17.02.2023

The article presents the result of the analysis, based on a literature review: the structure, optical and electronic properties of Mg₂Si in bulk and low-dimensional states. The properties of magnesium silicide in the low-dimensional state are compared with the properties of materials widely used in optoelectronics: GaAs, Si and Ge. Modern methods of forming Mg₂Si thin films are analyzed. It has been established from the literature data that, under conditions of thermodynamic equilibrium, the volumetric Mg₂Si has a face-centered cubic lattice, and the low-dimensional one has 2/3√3-R30°. Due to its optical and electronic properties, thin-film Mg₂Si is a promising material for optoelectronic devices. Thus, it has an incident light absorption coefficient, the maximum value of which, according to modern data, is 96 %. The photosensitivity range of Mg₂Si is in the range from 200 to 2100 nm. It was also determined from the review that this silicide is a non-bandgap semiconductor: the band gap of which is in the range from 0.6 to 0.8 eV. At the same time, direct transitions corresponding to energies from 0.83 to 2.17 eV are observed. The mobility of Mg₂Si electrons in the low-dimensional state ranges from 400 to 550 cm²·V⁻¹·s⁻¹, and holes – from 65 to 70 cm²·V⁻¹·s⁻¹. From the data considered, it was found out that the efficiency of photovoltaic conversion, for silicon–magnesium-based compounds with optimal thickness and impurity alloying, can reach 10–12 % for p–n and n–p (Si/Mg₂Si) and 22 % for p–n–p (Si/Mg₂Si/Si) structures. According to parameters such as the photosensitivity range and the band gap, the values of which are given above, Mg₂Si in the low-dimensional state exceeds GaAs, Si and Ge, and therefore can be considered a promising material for optoelectronics.

Keywords: thin films, magnesium silicide, silicon, optical sensors, structural analysis, optical properties, electronic properties, methods of formation.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-1-52-60

REFERENCES

1. Sanko S. A., Karimbayev D. D. and Zhidik Yu. S., Electronic means and control systems. Materials of the XVI Intern. Scientific and Practical Conf. Tomsk, 2020, p. 103–106.
2. Goroshko D. L., Fomin D. V., Gouralnik A. S. and Galkin N. G., Chemical physics and mesoscopy **11** (3), 353–360 (2009).
3. Galkin N. G., Fomin D. V., Dubov V. L., Galkin K. N., Pyachin S. A. and Burkov A. A., Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum. **386**, 48–54 (2018).
4. Galkin N. G., Goroshko D. L., Galkin K. N., Chusovitina E. A., Chusovitina S. V., Dubov V. L. and Fomin D. V., Japanese Journal of Applied Physics **59** (SF), SFFA11 (2020).
5. Ramirez D. C., Macario L. R., Cheng X., Kleinke H., Cino M., Walsh D. and Tseng Y.-C., ACS Applied Energy Materials **3** (3), 2130–2136 (2020).
6. Toriyama M. Y., Brod M. K. and Snyder G. J., ChemNanomater. **8** (9), (2022).
7. Stathokostopoulos D., Teknetzi A., Tarani E., Karfaridis D., Chrissafis K., Hatzikraniotis E. and Vourlias G., Results in Materials **13** (1), 100252 (2022).
8. Shaposhnikov V. L., Krivosheeva A. V. and Borisenko V. E., Journal of the Belarusian State University **1**, 73–81, (2017).
9. Lunyakov Yu. V., Solid state physics **62** (5), 783–787 (2020).
10. Seth P., Parkash O. and Kumar D., The royal society of chemistry **10**, 37327–37345 (2020).
11. Yu H., Gao C., Zou J., Yang W. and Xie Q., Photonics **8** (11), 509 (2021).
12. Yu H., Deng R., Mo Z., Ji S. and Xie Q., Nanomaterials **12** (18), 3230 (2022).
13. Onizawa Y., Akiyama T., Hori N., Esaka F. and Udono H., JJAP Conf. Proc. **5**, 011101 (2017).
14. Akiyama T., Hori N., Tanigawa S., Tsuya D. and Udono H., JJAP Conf. Proc. **5**, 011102 (2017).
15. Shevlyagin A., Chernev I., Galkin N. G., Gerasimenko A. V., Terai Y., Hoshida H., Nishikawa N., Ohdaira K. and Gutakovskii A., Solar Energy **211**, 383–395 (2020).
16. Liao Y.-F., Xie Q., Xiao Q.-Q., Chen Q., Fan M.-H., Xie J., Huang J., Zhang J.-M., Ma R., Wang S.-L., Wu H.-X. and Fang D., Applied Surface Science **403**, 302–307 (2017).
17. Shevlyagin A., Il'yaschenko V., Kuchmizhak A., Mitsai E., Sergeev A., Gerasimenko A. V., Gutakovskii A., Applied Surface Science **602** (2022).
18. Kirpichnikova I. M., Khvostov D. A., Timin N. V. and Muzhagitov Ya. R., Technical opponent **1** (1), 54–57 (2018).
19. Kaplunov I. A. and Rogalin V. E., Photonics **13** (1), 88–106 (2019).
20. Gusakov V. E., Reports of the National Academy of Sciences of Belarus **59** (1), 53–57 (2015).
21. Alekseev A. Yu., Kropachev O. V., Chernev I. M. and Galkin K. N., Radio Engineering and electronics: collection of abstracts of the 57th scientific Conference of graduate students, undergraduates and students. Minsk. 2021, pp. 97–99.
22. Isachenko G. N., Samunin A. Yu., Zaitsev V. K., Gurieva E. A. and Konstantinov P. P., Physics and technology of semiconductors **51** (8), 1048–1051 (2017).
23. Isachenko G. N., Samunin A. Yu., Konstantinov P. P., Kasyanov A. A. and Masalimov A. M., Physics and semiconductor technology **53** (5), 612–615 (2019).
24. Gouralnik A. S., Maslov A. M., Dotsenko S. A., Shevlyagin A. V., Chernev I. M., Il'yashenko V. M., Kitan S. A., Galkin K. N., Galkin N. G., Ustinov A. Y., Gerasimenko A. V. and Koblova E. A., Applied Surface Science **439**, 282–284 (2018).
25. Gouralnik A. S., Shevlyagin A. V., Chernev I. M., Ustinov A. Y., Gerasimenko A. V. and Gutakovskii A. K., Materials Chemistry and Physics **258**, 123903 (2021).
26. Fomin D. V., Astapov I. A. and Polykov A. V., Sixth Asian School-Conf. on Physics and Technology of Nanostructured Materials: Proceedings. Vladivostok. 2022, pp. 105–106.