

Рис.6. Структурная схема системы питания для сборки магнетронов.

Оптическая спектроскопия полупроводниковых пленок MoS₂

А.И.Беликов, Чжо Зин Пью, А.И.Семочкин
Москва, МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., 5,
кафедра МТ-11 ("Электронные технологии в машиностроении")
E-mail: belikov@bmstu.ru

Представлены результаты исследования тонких пленок дисульфида молибдена, формируемых методом магнетронного распыления на подложках из кремния, методом оптической спектроскопии. Расчетно-графическим методом определены значения ширины запрещенной зоны (ШЗЗ) полученных образцов.

Optical spectroscopy of semiconductor MoS₂ films. A.I.Belikov, Kyaw Zin Phyoo, A.I.Syomochkin. The results of studying the optical properties of molybdenum disulphide thin films formed by the magnetron sputtering MoS₂ target on silicon substrates are presented. Optical band gap energy (E_g) is calculated by estimating-plotting method.

Введение

В последнее время дисульфид молибдена (MoS₂) является широко исследуемым материалом, ультратонкие пленки MoS₂ обеспечивают высокие показатели эффективности электронных приборов (низкое энергопотребление, высокая чувствительность) при использовании в таких устройствах, как полевой транзистор [1] и фотодетектор [2]. Благодаря высокой подвижности носителей заряда и стабильности электрических свойств при больших деформациях ультратонкие пленки MoS₂ перспективны для применения в различных устройствах нанoeлектроники. Молекулярный слой пленки MoS₂ гексагональной структуры является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны равной 1.8 эВ, обладает высокой подвижностью носителей заряда (до 700 см²·В⁻¹·с⁻¹), большим оптическим поглощением (10⁷м⁻¹), в опытных экземплярах полевых транзисторов достигались высокие значения соотношения токов в

открытом и закрытом состоянии (10^7 – 10^8). Все это открывают широкие перспективы применения рассматриваемых пленок в перспективных устройствах электроники и оптоэлектроники, способствует интенсификации исследований в этой области [3]. Поэтому разработка методов получения и исследование свойств тонких пленок MoS_2 является актуальной задачей.

Толщина является одним из важных геометрических параметров элементов электронных устройств, определяет электронные, оптические и термические свойства пленок. Уменьшение толщины пленок материалов, обладающих непрямо́й запрещенной зоной, до монослоя, может приводить к появлению прямо́й запрещенной зоны, как в случае с MoS_2 [4].

Целью работы явилось исследование оптического спектра отражения и определение ширины запрещенной зоны тонких пленок MoS_2 различной толщины, полученных методом магнетронного распыления на кремниевых подложках. Спектральные характеристики пленок изучались с помощью спектрофотометра "Epsilon". Для измерения толщины пленок использовался атомно-силовой микроскоп АСМ "Solver Next".

Методика исследования

Для определения величины ширины запрещенной зоны полупроводников, используется подход, основанный на оценке энергии фотонов, близких по значению к ширине запрещенной зоны (E_g), при которой наблюдаются процессы поглощения фотонов. Постепенное увеличение энергии фотонов вблизи ширины запрещенной зоны, приводит к плавному переходу от пропускания фотонов к их поглощению. Если энергия фотонов значительно превышает значение ширины запрещенной зоны, то вероятность поглощения фотонов увеличивается и растет количество переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Известно, что мономолекулярные пленки MoS_2 , обладают свойствами прямозонного полупроводника, при наличии в пленке двух и более молекулярных слоев MoS_2 становится непрямо́зонным полупроводником, а ширина запрещенной зоны уменьшается с увеличением количества слоев и достигает значения в 1.3 эВ для массивного кристалла. В зависимости от типа полупроводника оценка процессов поглощения фотонов для прямого и непрямого перехода электронов проводится на основании формул, полученных Тауцем [5] для частотной зависимости коэффициента поглощения (1) и (2). Так, спектральная зависимость коэффициента поглощения характеризуется формулами:

$$(\alpha h\nu)^2 \approx (h\nu - E_g) \quad (1)$$

для прямого перехода и

$$(\alpha h\nu)^{1/2} \approx (h\nu - E_g) \quad (2)$$

для непрямого перехода, где $h\nu$ – энергия фотона, E_g – оптическая ширина запрещенной зоны, α – коэффициент поглощения образца.

Коэффициент поглощения может быть определен с использованием уравнения (3) Кубелка-Мунка (Kubelka-Munk) [6], связывающего коэффициент отражения и коэффициент поглощения образца:

$$\frac{\alpha}{s} = \frac{(1 - R)^2}{2R}, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения, s – коэффициент рассеяния.

Коэффициент рассеяния зависит от особенностей среды – размерности частиц и показателя преломления, слабо зависит от длины волны и коэффициента поглощения, поэтому в модели Кубелка-Мунка s считается величиной постоянной.

В работе [7] было показано, что на основании графических зависимостей $(\alpha h\nu)^{1/2}$ от $h\nu$ для пленок MoS_2 может быть определено значение ширины запрещенной зоны. Так, полу-

ченными авторами значения ШЗЗ для пленок MoS₂ толщиной 1.99 нм и 1.83 нм составляли 1,61 эВ и 1,36 эВ, соответственно, что хорошо согласуется с другими литературными данными [8]. Суть расчетно-графического метода заключается в использовании расчетного соотношения (2) для построения графика зависимости $(\alpha hv)^{1/2}$ от hv и определения E_g путем экстраполяции линейного участка графика, из области более высоких энергий, на ось энергии, когда $(\alpha hv)^{1/2}$ принимает значение равное нулю (рис. 2). Точка пересечения прямой с осью энергии определяет значение энергии для ширины запрещенной зоны.

Результаты

Подготовка образцов для исследований. Нанесение тонких пленок дисульфида молибдена проводили методом магнетронного распыления в вакууме прессованной мишени, изготовленной холодным прессованием порошка MoS₂ марки ДМИ-7, на подложки из кремния при давлении аргона в камере установки порядка 10⁻¹ Па. Процесс осуществлялся на постоянном токе при температуре подложек примерно 300 °С. В результате были подготовлены два образца, различающиеся толщиной. Толщину образцов определяли путем маскирования части поверхности подложки, с последующим измерением высоты, полученной таким образом, ступеньки. Измерения осуществлялись на АСМ "Solver-NEXT" компании "NT-MDT".

Измерение спектральных характеристик коэффициента отражения подготовленных образцов с покрытиями проводили на спектрофотометре "Epsilon" при нормальных условиях в диапазоне длин волн 380 – 1100 нм. Предварительно прибор тарировался с использованием кремниевых образцов. Результаты измерений приведены на рис. 1.

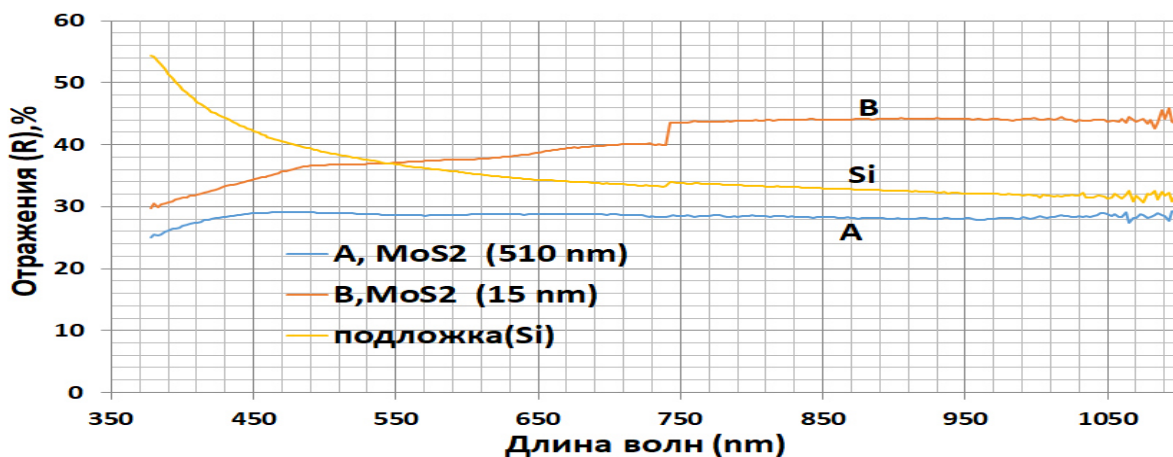


Рис. 1. Спектры отражения кремниевого образца и плёнок MoS₂ толщиной 510 нм (образец А) и 15 нм (образец В), нанесенных на кремниевые подложки.

На следующем этапе, на основании полученных численных значений коэффициента отражения для разных длин волн определялись значения коэффициентов поглощения с использованием зависимости (3). По расчетным значениям коэффициентов поглощения строились графики зависимости $(\alpha hv)^{1/2}$ от hv , для образца А с покрытием дисульфида молибдена толщиной 510 нм, зависимости представлены на рисунке 2. В последующем, с помощью экстраполяции на линейных участках графиков определялись значения ШЗЗ для каждого из образцов (рис. 2).

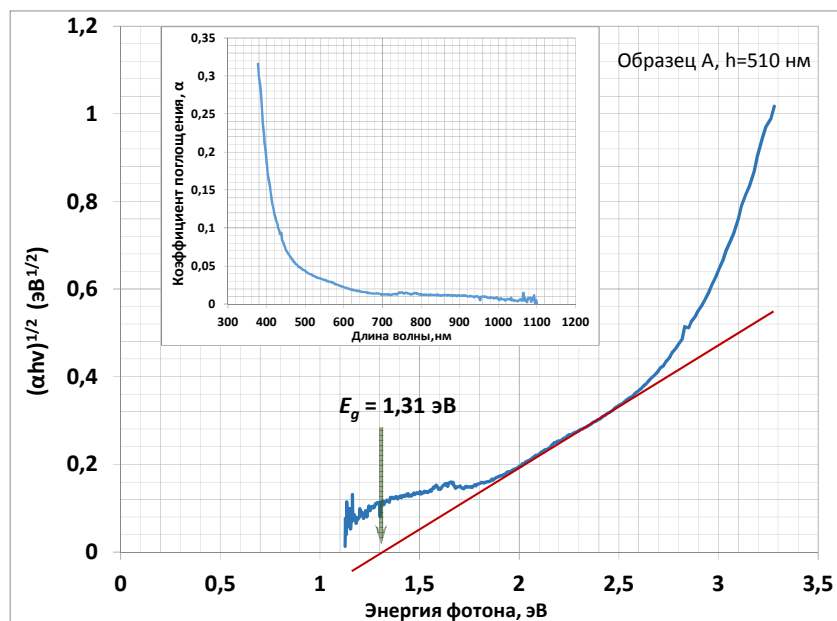


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента поглощения от длины волны (на вставке) и $(\alpha h\nu)^{1/2}$ от $h\nu$ для плёнки MoS_2 толщиной 510 нм. Тонкая прямая линия – линия экстраполяции линейного участка графика до значения $(\alpha h\nu)^{1/2} = 0$.

Заключение

Полученные экспериментальные данные для пленки толщиной 510 нм (образец А) согласуются с имеющимися в литературных источниках сведениями о величине ШЗЗ для пленок MoS_2 . Значение ШЗЗ для образца А, определенное расчетно-графическим методом составило 1.31 эВ.

Для массивного кристалла MoS_2 величина E_g имеет значение 1.3 эВ. Также известно, что наиболее существенно величина ШЗЗ изменяется при уменьшении толщины пленки MoS_2 до значений, соответствующим менее чем 7-8 молекулярным слоям. Результаты работы свидетельствуют о том, что уже при толщинах порядка 0.5 мкм для пленок MoS_2 наблюдается увеличение ШЗЗ в сравнении с массивным кристаллом MoS_2 .

Используемая методика не позволила получить адекватное значение ШЗЗ для образца В с пленкой MoS_2 толщиной 15 нм. Как видно из спектральных характеристик коэффициента отражения, представленных на рис. 1, более тонкая пленка в диапазоне более длинных волн продемонстрировала значения коэффициента отражения, превышающие значения, полученные для кремниевой подложки, в отличие от образца А, для которого во всем диапазоне наблюдались значения коэффициента отражения ниже, чем у кремния. Таким образом, требуется дополнительное изучение и анализ для прояснения обнаруженного факта.

Литература

1. Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J., Giacometti V., Kis A. Single-layer MoS_2 transistors.// Nature Nanotech.- 2011, V. 6, P.147-150.
2. Yin Z., Li H., Jiang L., Shi Y., Sun Y., Lu G., Zhang Q., Chen X., Zhang H. Single-layer MoS_2 phototransistors.// ACS Nano . -2012, V.6(1), P.74–80.
2. Xia F, et al., 2014 Nature Photonics.8:899-907.
3. K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, and T. F. Heinz, Atomically Thin MoS_2 : A New Direct-Gap Semiconductor, Phys. Rev. Lett., 105, 136805 (2010).
4. Тауц Я. Оптические свойства полупроводников в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. // Успехи физических наук. – 1968, т.94, № 3, с. 501-534.
5. Kubelka and Munk Zeit 1931 Für Tekn. Physik 12 p593.
6. Chanyoung Yim, Maria O'Brien. Investigation of the optical properties of MoS_2 thin films using spectroscopic ellipsometry. Applied Physics Letters 104, 103114 (2014).

7. Miika Mattinen. Atomic Layer Deposition of Crystalline MoS₂ Thin Films: New Molybdenum Precursor for Low-Temperature Film Growth. Adv. Mater. Interfaces 2017, 4, 1700123.

Модернизация магнитной системы жидкофазного магнетрона для повышения мощности разряда

*А.А. Храмова, А.Р. Матанин, Д.А. Полин, Д.Д. Васильев, К.М. Моисеев
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
E-mail: annakhramova3@gmail.com*

В статье предложен метод сравнения магнитных систем магнетрона для процесса жидкофазного магнетронного распыления. Проведено компьютерное моделирование существующей и разработанной систем, а также проведен эксперимент по сравнению магнитных систем по мощности разряда. Определено, какие характеристики магнитной системы оказывают большее влияние на значение мощности разряда.

Comparison of magnet systems of the magnetron with liquid-phase target for power improvement. A.A. Khramova, A.R. Matanin, D.A. Polin, D.D. Vasiliev, K.M. Moiseev. The method of magnet systems comparison for magnetron sputtering process with liquid-phase target has been proposed. A computer simulation of the existing and proposed systems has been carried out, as well as an experiment comparing magnetic systems due to their discharge power. The characteristics of the magnetic system are determined which produce a greater effect on the value of the discharge power.

Введение

В настоящее время толсто пленочные проводящие покрытия получили широкое применение в таких областях, как ветроэнергетика, гибридная энергетика, силовая микроэлектроника, а также производство термоэлектрических модулей.

Метод магнетронного распыления является одним из наиболее распространенных для формирования проводящих покрытий в вакууме [1]. Развитием метода магнетронного распыления является формирование покрытий с помощью магнетрона с жидкой мишенью. Катодом в этом методе является расплавленный материал мишени, который находится в изолированном от системы охлаждения тугоплавком тигле (рисунок 1). При изолировании мишени от системы охлаждения магнетрона происходит ее расплавление, вследствие чего начинается активное испарение материала мишени, что увеличивает скорость осаждения частиц. Высокое давление насыщенного пара материала мишени позволяет проводить процесс ее «самораспыления» при отсутствии инертного газа, что снижает концентрацию примесей в формируемом покрытии [1, 2]. Так же к преимуществам данного метода относят практически 100% использование материала мишени и низкие энергозатраты [3].

Для того чтобы расплавить мишень в процессе жидкофазного магнетронного распыления, нужно обеспечить необходимую мощность разряда. На мощность разряда при магнетронном распылении влияют такие параметры процесса, как напряжение разряда, рабочее давление и величина магнитной индукции на поверхности мишени. При этом под мощностью разряда подразумевается результат снятой ВАХ процесса, а именно произведение напряжения разряда на ионный ток [2]. При рассмотрении параметров, влияющих на мощность разряда, напряжение разряда и рабочее давление процесса ограничены характеристиками установки, в то время как величина магнитной индукции на поверхности мишени может быть изменена за счет конструктивных особенностей магнитной системы магнетрона.

В магнитной системе магнетрона НМСА-52М производства АО «НИИТМ» (рис. 1) установлены магниты из SmCo. Одним из возможных вариантов повышения магнитной индукции на поверхности мишени является замена существующих магнитов на более сильные по магнитным свойствам магниты из NdFeB. Однако изготовление кольцевых магнитов из NdFeB нецелесообразно по экономическим соображениям, а так же этот процесс занимает большое коли-