

ПОЛУПРОВОДНИКОВ ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Кадиоров А.Р.

Каршинский государственный университет, докторант

*e-mail: asilbekqodirov980@gmail.com ORCID 0009-0005-9669-1567

Нормурадов М.Т.

Каршинский государственный университет, профессор

e-mail: m.normuradov46@mail.ru ORCID 0000-0003-1771-0853

Пармонов Ж.Р.

Центр педагогического мастерства Кашкадарьинской области

e-mail: parmjahongir123@mail.com

Ишмуродов Э.А.

Каршинский государственный университет, докторант

e-mail: elmurodeshmurodov@gmail.com

Раджабов Р.Б.

e-mail: ramazonrb950301@gmail.com

Аннотация. В этой статье представлена информация о тонких пленках и рассмотрены основные процессы, происходящие в процессе их образования. Кратко рассмотрены и основные способы их получения, приведены сравнительные характеристики этих методов. Представлена и описана зонная схема полупроводников. Подробно рассмотрены принципы и режимы работы устройства магнетрона с использованием инвариантного (DC) и радиочастотного (RF) распыления и ионно-плазменного метода наноматериалов.

Ключевые слова: тонких пленок, кремний, германий, ширины запрещенной зоны, ионно-плазменного, гетероструктура.

NANOELEKTRONIKADA YARIM O'TKAZGICHLI YUPQA PLYONKALAR

Qodirov A.R.

Qarshi davlat universiteti doktoranti

*e-mail: asilbekqodirov980@gmail.com ORCID 0009-0005-9669-1567

Normurodov M.T.

Qarshi davlat universiteti professori

e-mail: m.normuradov46@mail.ru ORCID 0000-0003-1771-0853

Parmonov J.R.

Qashqadaryo viloyati Pedagoglarni qayta tayyorlash markazi o'qituvchisi

e-mail: parmjahongir123@mail.com

Ishmurodov E.A.

Qarshi davlat universiteti doktoranti

e-mail: elmurodeshmurodov@gmail.com

Rajabov R.B.

e-mail: ramazonrb950301@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada yupqa plyonkalar haqida ma'lumot berilgan va ularning shakllanishi jarayonida yuzaga keladigan asosiy jarayonlar ko'rib chiqilgan. Ularni olishning asosiy usullari ham qisqacha ko'rib chiqilib, bu usullarning qiyosiy tavsiflari keltirilgan. Yarimo'tkazgichlarning zona diagrammasi keltirilgan va tavsiflangan. O'zgarmas (DC) va radio chastotali (RF) purkash va nanomateriallarning ion-plazma usulidan foydalanib MAGNETRON qurilmasining ishlash prinsiplari va rejimlari batafsil ko'rib chiqildi.

Kalit so'zlar: yupqa plyonkalar, kremniy, germaniy, taqiqlangan zona, ion-plazma, geterostruktura.

SEMICONDUCTOR THIN FILMS IN NANOELECTRONICS

Kadirov A.R.

Karshi State University, PhD student

**e-mail: asilbekqodirov980@gmail.com ORCID 0009-0005-9669-1567*

Normuradov M.T.

Karshi State University, professor

e-mail: m.normuradov46@mail.ru ORCID 0000-0003-1771-0853

Parmonov Zh.R.

Center for Pedagogical Excellence of Kashkadarya Region

e-mail: parmjahongir123@mail.com

Ishmurodov E.A.

Karshi State University, PhD student

e-mail: elmurodeshmurodov@gmail.com

Radjabov R.B.

e-mail: ramazonrb950301@gmail.com

Abstract. This article provides information about thin films and considers the main processes that occur in the process of their formation. The main methods of obtaining them are also briefly considered, and comparative descriptions of these methods are presented. A zone diagram of semiconductors is presented and described. Principles and modes of operation of a MAGNETRON device using the ion-plasma method of constant (DC) and radio frequency (RF) spraying and nanomaterials were examined in detail.

Keywords: thin films, silicon, germanium, band gap, ion-plasma, heterostructure

Введение

В качестве материалов микроэлектроники используются легированные полупроводники, в наноэлектронике – гетероструктуры, наноструктурные материалы, кластеры, органические материалы т.е., технология формирования наноструктур. Таким образом, под наноэлектроникой будем понимать направление электроники, в котором изучаются физические явления и процессы взаимодействия электронов с электромагнитными полями, а также разрабатывается нанотехнологии создания приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для передачи обработки и хранения информации [1]. Очень малая инерционность электронов позволяет эффективно использовать взаимодействие электронов с микрополями внутри атома, молекулы или кристаллической решетки для создания приборов нового поколения, отличающихся высоким производительносью, малым потреблением энергии, сверхминиатюрными размерами. По мере приближения размера твердотельной структуры электронного прибора к нанометровой области, соизмеримой с размерами атомов, проявляется квантовые свойства электронов. Как известно в

микроэлектронных приборах поведение электрона определялось, поведением элементарной частицы, имеющей массу и заряд, то в нанoeлектронных приборах, поведение электрона определяется его волновыми свойствами.

Германий и кремний имеют важное значение в качестве полупроводниковых материалов в нанoeлектронике. Германий - элемент IV группы, который получают из тетрахлорида германия, который затем преобразуют в германий диоксид, восстанавливаемый в водородной печи. Германий должен иметь высокий уровень чистоты, так как он широко используется при изготовлении полупроводниковых устройств [2]. Кремний, также являющийся элементом IV группы, получают из метилтрихлорсилана, который преобразуют в высокочистый кремний в виде порошка. Кременит восстанавливается при температуре 1000 °С, и его способность к кристаллическому формированию делает его идеальным материалом для электроники. Полупроводниковые свойства обоих материалов необходимы для современной электроники, поскольку они позволяют снизить потребление энергии и обеспечить высокую эффективность [3].

Для изготовления полупроводниковых приборов слитки кремния распиливают на тонкие пластинки, поверхность которых протравливают для устранения дефектов обработки. Основные свойства кремния включают его полупроводниковые характеристики, термостойкость и способность к кристаллическому формированию, что делает его идеальным материалом для использования в электронике. Основные свойства германия и кремния также приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные свойства германия и кремния

Свойства	Германий	Кремний
Собственное удельное сопротивление при 20°С, $\Omega \cdot \text{м}$	0,68	$2 \cdot 10^5$
Собственная концентрация носителей, м^{-3}	$2,5 \cdot 10^{18}$	10^{16}
Ширина запрещенной зоны, эВ при 0 К	0,785	1,14
Ширина запрещенной зоны, эВ при 300 К	0,72	1,1

Методика эксперимента

В этом исследовании тонкие пленки наносились на поверхность основания из монокристаллов кремния с помощью устройства для распыления постоянного и радиочастотного магнетрона. Процесс осаждения осуществлялся при температуре 400 °С с помощью вакуумной печи с автоматическим управлением. При осаждении тонких пленок кремния в атмосфере аргона в вакууме 10^{-4} торр скорость всплеска составляла 50 Å/с, а

при частоте 100 кГц и D=70% мощность 240 Вт использовалась в течение 6-8 минут в реактивном радиочастотном режиме. Максимальная скорость опыления магнетрона составляла 50 Å/с [5].

Результаты и их обсуждение

Для изготовления полупроводниковых приборов применяют германий с определенными добавками электрически активных примесей, основные используемые примеси доноры в германий создают P, Se, S, Акцепторы-Jn, В, Al, Ag. В германий создают глубокий уровни - O₂, Ni, Cu. Для получения монокристаллического Ge с низким удельным сопротивлением ($\rho=7\cdot10^{-5} \div 5\cdot10^{-3} \Omega\cdot\text{см}$) его легируют мышьяком. Германий применяют для изготовления радиочастотные (RF) и сверхвысокочастотные (UHF) – транзисторов, диодов, тензодатчиков, датчиков ЭДС Холла и других магнитчувствительных приборов. Приборы, изготовленные с использованием германия, обладают высоким быстродействием. Хорошие оптические свойства германия позволяют использовать его для изготовления фототранзисторов и фотодиодов, оптических линз для инфракрасных лучей, оптических фильтров, счетчиков ядерных частиц. Существенным недостатком германия является диапазон рабочих температур германиевых приборов $-600 \div +700$ °C (из-за малой ширины запрещенной зоны) и высокая стоимость [6,7].

Возникновение проблем подобного рода препятствует широкому применению и полупроводниковых соединений. Например, очень сложно вырастить высококачественный окисел на поверхности GeAs, так как один элемент окисляется легче другого, оставляя на поверхности металлическую фазу. Такой материал сложно легировать и трудно получать слитки большого диаметра и совершенной кристаллической структуры. Развитие технологии соединений AIIIIV связано, в частности, с достижениями прежде всего в области кремниевой технологии.

Таким образом, достоинством кремния является большая ширина запрещенной зоны, что обеспечивает работу приборов при достаточно высоких температурах. Недостатками являются низкие значения подвижности электронов и дырок и относительно высокая стоимость. Параметры монокристаллов кремния приведены в таблице 1 [8]. Для получения кремния p-типа проводят легирование акцепторными примесями – алюминий(Al) или бором(B). Энергия активации примесей равна 0,057 и 0,045 эВ, соответственно.

Легирование – внедрение наибольших количеств примесей или структурных дефектов с целью контролируемого изменения электрических свойств полупроводника, в частности, его типа проводимости.

Полупроводниковые гетероструктур является основой большого количества современных транзисторов и приборов квантовой и микроволновой электроники. Гетеропереходе, когда решетка одного полупроводника без нарушения периодичности переходит в решетку отличающегося по химическому составу другого полупроводника. На этой границе изменяются свойства полупроводниковой системы структура энергетических зон, эффективных масса и подвижностей носителей. Контакты двух полупроводников с разной шириной запрещенной зоны между ними устанавливается термодинамическое равновесие и уровень Ферми становится общим [9,10].

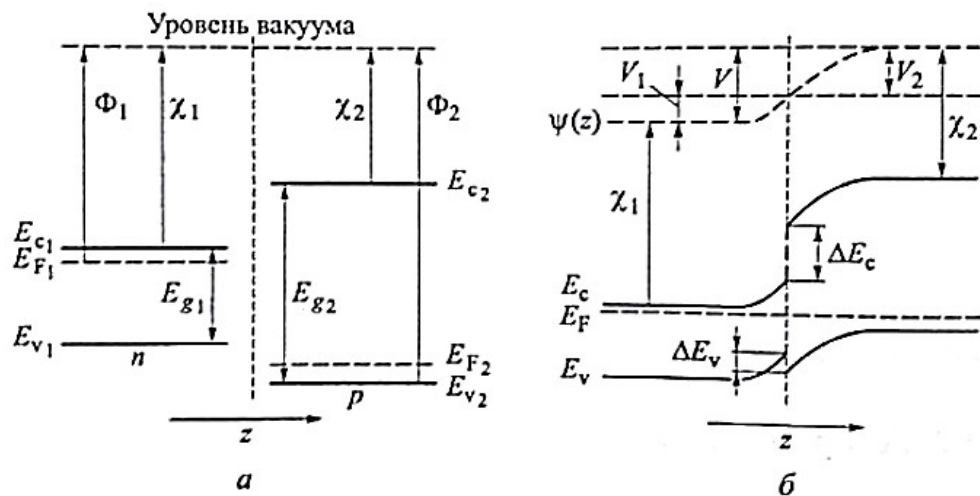


Рис.1. Зонная диаграмма двух полупроводников (а) и сформированного резкого гетероструктура n-p (б)

Зонная диаграмма полупроводника достаточно полно описывает свойства гетеро переходов. На рис 1, (а) представлена зонная диаграмма двух изолированных полупроводников. При их соединении образуются n-p гетероструктура (рис 1, б). Отметим, что заглавная буква p- обозначает тип проводимости более широкозонного проводника; E_c , E_v , E_F – соответственно, для зоны проводимости, потолок валентной зоны, уровень Ферми. Если работа выхода полупроводнике n – типа обозначить Φ_1 , а работу выхода полупроводника p-типа- Φ_2 , то контактная разность потенциалов определяется по формуле

$$V=(\Phi_1-\Phi_2)/q \quad (1)$$

где q -элементарный заряд.

Известно, что несколько гетеропереходов формирует гетероструктуру. Размер гетероструктуры может составлять несколько десятков нанометров. Длина волны электрона в полупроводниках при низких температурах лежит в том же диапазоне длин, движения носителей в гетероструктурах может быть

описана только с учетом законов квантовой механики. Квантово-механический характер физических процессов в гетероструктурах позволяет их выделить в класс объектов, отличных от традиционных элементов микроэлектронике.

Наиболее востребованными методами вакуумного нанесения покрытий на различного рода поверхности является термическое испарение, электроннолучевое испарение и различные виды ионно-плазменного распыления. При этом как раз методы нанесения тонких пленок, в основе которых лежит распыление материала ионами тяжелых газов.

К таковым относятся интенсивно развиваемые в последнее время ионнолучевой и магнетронный нанесения тонко пленочных структур. Они обладают рядом преимуществ; возможность получения новых материалов, оксидов, хорошие адгезионные и физико-химические свойства пленок. Особенно важно при производстве элементы микроэлектроники требуют нанесения многослойных покрытий типа металл-диэлектрик, металл-диэлектрик-металл, металл-полупроводник-диэлектрик – металл и т.п., что требует применения разнообразного вакуумно-плазменного оборудования.

В процессах ионно-плазменного нанесения осаждаемый на подложку материал получают путем распыления твердотельной мишени ионами с определенными энергиями (основном конами Ar^+). На кафедре ТЭФ имеется установки магнетронного распыления PVD-DESK-PRO. С использованием этих устройств создавались технологии получения нанослоев на основе проводящих пленок Cu, Al, Co, Mn, Ti, Ba силицидов металлов, диэлектрических пленок SiO_2 , Si_3N_4 , а также соединения Mn_4Si_7 , TiO_2 , Al_2O_3 и других пленок с более сложным составом [11-13].

Принцип действия распылительных устройств магнетронного типа основан на использовании скрещенных электрического и магнитного полей для формирования траекторий электронов в плазме в виде замкнутой спиралевидной кривой. Магнитное поле, силовые линии которого параллельны поверхности распыляемой мишени магнетрона, удерживает, электроны в непосредственной близости от мишени, в так называемой электронной "ловушке" создаваемой скрещенными электрическим и магнитным полями. Осцилляции электронов и их движение по спиралевидным траекториям увеличивает число ионизационных столкновений, в результате увеличивается плотность плазмы, воздействие которой на мишень обеспечивает высокую скорость распыления материала мишени [14-18].

Применение диэлектрических материалов, повышение требований к качеству покрытий, увеличение размеров подложку привели изменение

магнетронных распылительных систем с использованием высокочастотных напряжений.

Отличительной особенностью магнетронных распылительных систем является большая концентрация плазмы в непосредственной близости от распыляемой мишени, благодаря наличию магнетронного поля. Поэтому в магнетронных распылительных системах возможно достижение больших значений отрицательного смещения, следовательно, RF большая эффективность распыления .

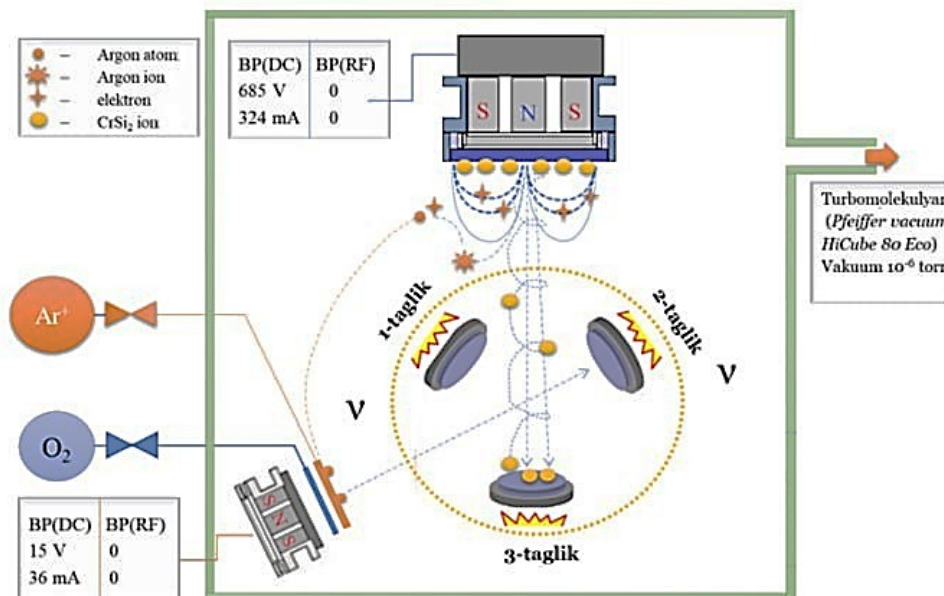


Рис.2. Схема магнетронного напыления. 1-катод, 2- клапан (Ar⁺), 3- заземления, 4-подложка (Si), 5-насос, 6-нагреватель, 7-анод (мишень)

Промышленностью освоен выпуск широкого спектра магнетронных систем нанесения покрытий с размерами мишеней 40÷240 мм, уровнем подводимой мощности 1÷10 кВт, которые работают с применением постоянного и RF напряжения, как на постоянных, так и на электромагнитах. Характерные величины, разрядных напряжений достигают нескольких киловольт, токи разряда от 1 до 15 ампер, диапазон рабочего давления 10⁻³ ÷ 10⁻² мм.рт.ст. Ниже приведены схемы ионно-плазменных устройств для напыления пленок показаны на рис.2.

В магнетронных распылительных системах вблизи катода образуется плазма тлеющего разряда достаточно высокой плотности за счет наложения магнитного поля. Определенной формы на электрическое поле, направленное от катода 1 к аноду 2 (рис 2) форма области плотной плазмы определяет конфигурацию зоны распыления, но мишени в виде канавки. Магнетронное распылением можно напылять все проводящие материалы, кроме магнитных. При распылении диэлектрических мишеней напыление

диэлектрических пленок возможно при условии, если на магнетрон подаётся высокочастотное напряжение или реализуется реактивное распыления.

Заключение

В данной статье рассмотрены основные аспекты формирования и применения полупроводниковых тонких пленок в нанoeлектронике. Обсуждены ключевые процессы, происходящие при их создании, а также методы получения, включая магнетронное распыление и ионно-плазменное напыление. Уделено внимание сравнительным характеристикам этих методов, что позволяет оценить их эффективность и область применения. Тонкие пленки на основе кремния и германия обладают уникальными свойствами, которые делают их незаменимыми в современных электрониках. Использование легированных полупроводников и гетероструктур открывает новые горизонты для разработки высокоэффективных устройств с меньшим энергопотреблением и улучшенными характеристиками. Применение методов ионно-плазменного и магнетронного распыления позволяет получать пленки с высокими адгезионными свойствами и необходимыми физико-химическими характеристиками. Эти методы обеспечивают возможность создания многослойных структур, что является важным для производства современных полупроводниковых приборов.

Таким образом, тонкие пленки представляют собой важный элемент в развитии нанoeлектроники, и дальнейшие исследования в этой области будут способствовать созданию новых технологий и материалов, что в свою очередь позволит улучшить параметры существующих электроники и развить новые направления в данной сфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилина Т.И., Троян Э.Е., Сахаров Ю.В., Жидик Ю.С. Ионноплазменные методы получения наноструктур. Доклады ТУСУРа, том 20, №3, 2017.
2. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology. John Wiley & Sons, 2006.
3. Streetman, B. G., & Banerjee, S. Solid State Electronic Devices. Prentice Hall, 2006.
4. Chen, Y. Nanostructure Materials. Springer, 2012.
5. Khan, M. A. Thin Film Technology. Wiley-Blackwell, 2007.
6. Bhattacharya, P. Semiconductor Optoelectronic Devices. Prentice Hall, 1997.

7. Pankove, J. I. Optical Properties of Semiconductors. Academic Press, 1971.
8. Madelung, O. Semiconductors: Data Handbook. Springer, 2004.
9. Liu, H. Nanotechnology: Principles and Practices. CRC Press, 2010.
10. Kumar, A., & Gupta, R. Advances in Semiconductor Nanostructures. Wiley, 2015.
11. Zhang, Y. Thin Film Deposition: Principles and Practice. Springer, 2011.
12. Reddy, K. R., & Reddy, C. S. Advanced Semiconductor Materials and Devices. CRC Press, 2018.
13. Friedman, M. Thin Film Technology: A Practical Approach. McGraw-Hill, 1999.
14. Nakamura, S. Blue Laser Diodes: Principles and Applications. Wiley, 2010.
15. Normuradov M.T., Normurodov D.A., Davronov K.T. Creation of new materials based on dielectric films using low-energy ion implantation, Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering: Vol. 1: Iss. 6, Article 8.
16. Bekpulatov I.R., Imanova G.T., Umirzakov B.E., Turapov I.X., Norbutaev N.E. Formation of thin CrSi₂ films by the solid-phase ion-plasma method and their thermoelectric properties. Materials Research InnovationsThis link is disabled., 2024, 28 (4), pp. 221–228
17. Dovranov K.T., Normuradov M.T., Davranov K.T., Bekpulatov I.R. Formation of Mn₄Si₇/Si(111), CrSi₂/Si(111), and CoSi₂/Si(111) thin films and evaluation of their optically direct and indirect band gaps. Ukrainian Journal of PhysicsThis link is disabled., 2024, 69 (1), pp. 20–2563
18. Dovranov K., Vinnichenko M., Kodirov A., Nabiyev D., Kurbonov N. Obtaining thin films from semiconductor compounds and their X-ray analysis. International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech, (2024), pp. 308-312.