

Влияние ионно-аргонной бомбардировки на спектральные и вольт-амперные характеристики кристаллов CdS вблизи края фундаментального поглощения

А. С. Батырев¹, Р. А. Бисенгалиев¹, Б.С. Лиджиев², Е.В. Сумьянова¹

¹ Калмыцкий государственный университет им. Б.Б.Городовикова, Элиста

² Ухтинский государственный технический университет

Аннотация: Приведены результаты исследований воздействия ионно-аргонной бомбардировки в вакууме на спектральное распределение фотопроводимости кристаллов CdS в области края фундаментального поглощения и на их вольт-амперные характеристики. Показано, что малодозовая ионно-аргонная бомбардировка приводит к росту фоточувствительности и темнового тока, а также к изменению спектрального распределения фототока за краем поглощения полупроводника.

Наблюдаемые спектральные изменения связываются с понижением поверхностной концентрации рекомбинационных центров, а также с ростом числа приповерхностных донорных собственно-дефектных центров, вызываемые воздействием ионов аргона на поверхность кристаллов CdS. Выдержка исследуемого кристалла CdS на воздухе, после воздействия на него ионами аргона, приводит обратному возрастанию числа рекомбинационных центров на поверхности образца за счет взаимодействия поверхности полупроводника с кислородом, содержащегося в воздухе.

Ключевые слова: ионно-аргонная бомбардировка, спектр фотопроводимости, кристалл CdS, поверхностная рекомбинация, вольт-амперная характеристика.

Введение

Исследование воздействия бомбардировки поверхности полупроводников ионами аргона позволяет изучать механизмы формирования поверхностных спектральных характеристик исследуемых материалов. Одним из наиболее интересных полупроводниковых материалов, обладающие яркими спектральными фотоэлектрическими характеристиками, являются кристаллы CdS, имеющие в настоящее время широкое научно-прикладное значение. Формирование фотоэлектрических свойств кристаллов CdS в области собственного поглощения происходит в тонком приповерхностном слое полупроводника. Это накладывает особые условия на качество и чистоту поверхности и приповерхностного слоя

полупроводника, которое может сильно изменяться под воздействием бомбардировки образца ионами аргона.

Цели и задачи исследования

Целью настоящего исследования является обнаружение закономерностей влияния ионно-аргонной бомбардировки на спектры фотопроводимости кристаллов CdS в области края фундаментального поглощения. Данное исследование предполагает изучение спектров фотопроводимости кристаллов CdS, а также их вольт-амперных характеристик до и после воздействия ионно-аргонной бомбардировки на поверхность исследуемого полупроводника.

Методика эксперимента

Известно несколько методов очистки поверхности полупроводников от различного рода загрязнений, образующихся на поверхности при взаимодействии атомов и молекул окружающей среды с кристаллической решеткой полупроводника. Одним из таких методов является ионно-аргонная бомбардировка поверхности исследуемого материала в вакууме [1].

Очистка поверхности от окисного слоя и различного рода загрязнений с помощью ионной бомбардировки в вакууме является неотъемлемой частью технологии получения атомарно чистой поверхности. Процесс ионной бомбардировки может сопровождаться изменением рельефа поверхности, образованием в приповерхностном слое радиационных точечных дефектов, а также модификацией свойств приповерхностного слоя полупроводника. При ионной бомбардировке, в зависимости от энергии частиц, может происходить удаление поверхностных примесей, а также нескольких верхних слоев

решетки исходного материала. При этом достаточно использовать ионы в несколько сотен электрон-вольт. Например, авторы [2] определили, что получить при комнатной температуре атомарно чистую поверхность, такого полупроводника как кремний, можно ионами аргона с энергией уже в 0,3 кэВ с последующим отжигом дефектов в вакууме при температуре 700 °С.

В эксперименте использовались «чистые» полупроводниковые монокристаллы CdS с удельным темновым сопротивлением $R \sim 10^{12}$ (Ом×см), которые были выращены методом пересублимации в потоке инертного газа или методом Фрерихса. Образцы монокристаллов CdS имели форму прямоугольных пластинок с площадью поверхности около 5 мм² и толщиной около 0,1 мм. Пластинки имели плоскую зеркальную поверхность. Расстояние между токоподводящими электродами составляло около 2 - 3 мм. Зондирующее монохроматическое излучение освещало область кристалла, расположенную между электродами. Омические электроды изготавливались нанесением на поверхность исследуемого кристалла пасты, состоящей из смеси индия и галлия.

В работе исследована стационарная фотопроводимость (ФП) кристаллов CdS в спектральной области края фундаментального поглощения и их темновая вольт-амперная характеристика (ВАХ). Эксперименты были выполнены при комнатной температуре. Измерение спектров ФП производилось на спектральной установке, собранной на базе дифракционного монохроматора типа МДР-3. Возбуждение ФП осуществлялось монохроматическим излучением, выделяемым монохроматором из спектра излучения светоизмерительной лампы накаливания типа СИ10-300у (мощность $P = 150$ Вт). Усиление фототока осуществлялось электрометрическим усилителем типа У5-9. Регистрация спектров ФП производилось на ленте самопишущего потенциометра КСП-4.

Ионно-аргонная бомбардировка исследуемых образцов осуществлялась на установке ВУП-3. Уровень вакуума при бомбардировке составлял около 4×10^{-5} мм.рт.ст., ускоряющее напряжение $U = 1$ кВ, а ток ионов $I \approx 8$ мА. Длительность бомбардировки $t \approx 10$ с. Система подачи газа в вакуумную камеру ВУП-3 была выполнена так, что в процессе бомбардировки практически весь поток ионов проходил через область расположения образца. В ходе бомбардировки ионами наблюдалось слабое свечение между образцом и анодом, расположенным на расстоянии 0,15 м выше образца.

Результаты исследования

На рис. 1 представлены спектры краевой ФП одного из исследованных образцов кристалла CdS, полученные в ходе проведения экспериментов. В исходном состоянии (до бомбардировки кристалла ионами аргона) в спектре проявляется широкий максимум фототока ($\lambda \approx 500$ нм), расположенный в области края фундаментального поглощения полупроводника (кривая 1). Такое спектральное распределение фототока характерно для кристаллов CdS первой группы, коррелирующие со спектром поглощения [3]. На длинноволновом спаде спектральной кривой фототока, в спектральной области около $\lambda \approx 517$ нм, можно наблюдать слабовыраженный максимум фототока, имеющий вид длинноволнового «плеча», который, согласно [3], приписывается дополнительному максимуму фототока DM_1 и связан с фототермическими переходами с участием собственно-дефектных состояний донорного типа. В коротковолновой области спектра ФП проявляется незначительное падение фоточувствительности (ФЧ) с понижением длины волны возбуждающего фототок излучения. Измерение спектра ФП (кривая 2) непосредственно после бомбардировки поверхности кристалла ионами аргона показало, что указанное воздействие значительно изменяет ход

спектральной зависимости фототока для данного образца в окрестности края поглощения. Бомбардировка кристалла ионами аргона привела к тому, что в коротковолновой области спектра проявляется рост ФЧ образца с понижением длины волны излучения, когда как в исходном состоянии наблюдается ее падение. Выдержка образца в течение 6 суток в темноте при нормальных условиях на воздухе приводит к спектральным изменениям, которые отражены на кривой 3. В результате выдержки наблюдается общее падение ФЧ, а также возвращение зависимости ФЧ кристалла от длины волны света в коротковолновой области спектра ФП, которая проявлялась в исходном образце (кривая 1).

Таким образом, бомбардировка ионами аргона поверхности кристаллов CdS приводит к значительным изменениям в спектральном распределении фототока в области края поглощения, особенно, в коротковолновой области спектров ФП полупроводника. Сходное поведение демонстрировали и другие образцы исследуемого полупроводникового материала.

Как было сказано ранее, кроме спектров ФП, измеренных в области края фундаментального поглощения, в исследуемом кристалле CdS также была измерена его ВАХ темнового тока до и после облучения образца ионами аргона. ВАХ кристалла представлена на рис. 2 и построена в виде экспериментальных точек.

В целом, во всем диапазоне используемых напряженностей электрического поля наблюдается почти омическая зависимость темнового тока. Можно заметить, что в результате ионно-аргонной бомбардировки кристалла CdS величина темнового тока, во всем диапазоне напряженностей, несколько увеличилась (данные 2), а после выдержки кристалла на воздухе в течение 6 суток, произошло незначительное падение ее величины (данные 3).

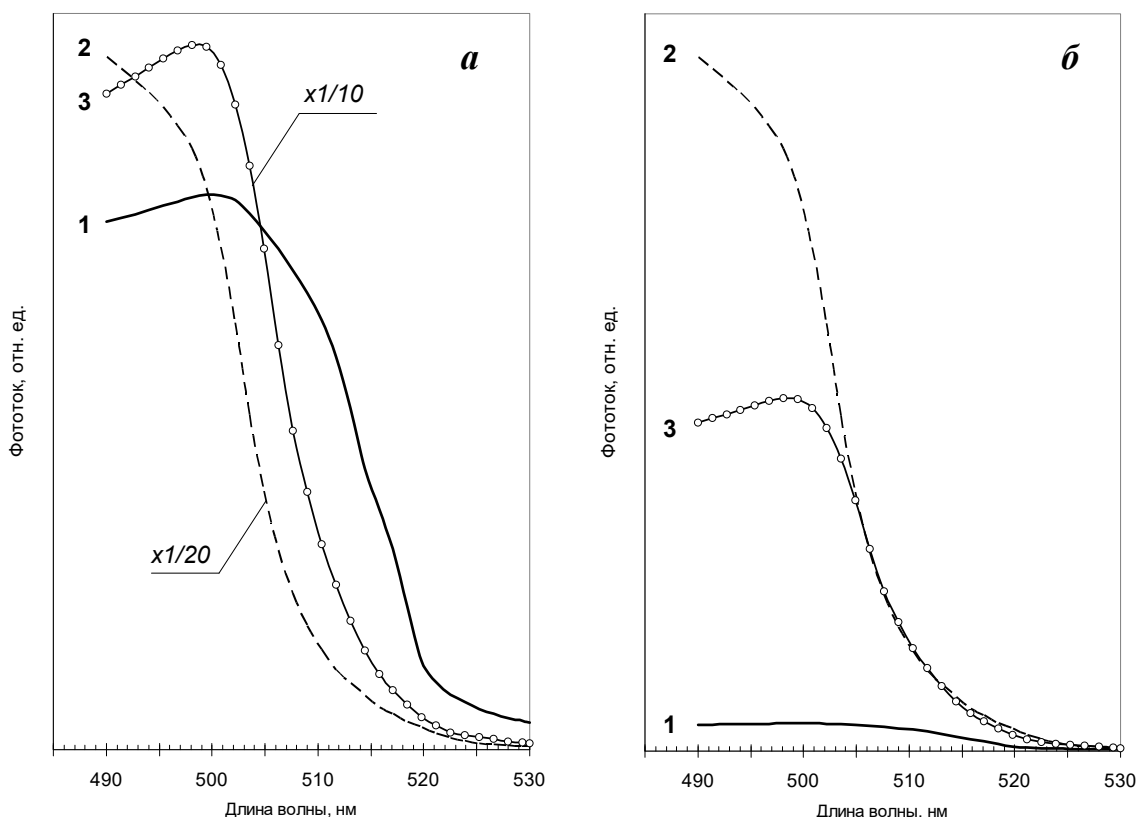


Рис. 1. - Спектры краевой фотопроводимости образца БМ-Л кристалла CdS до (кривая 1), после бомбардировки ионами в вакууме (кривая 2) и после выдержки кристалла при нормальных условиях на воздухе в течение 6 суток (кривая 3)

При этом ход зависимости для всех случаев остался практически таким же: все три кривые, с некоторой точностью, подчиняются закону Ома, т.е. имеют линейный рост тока в зависимости от напряженности поля. Различный наклон трех измеренных кривых свидетельствует о разной проводимости кристалла, индуцируемую в нем после определенных видов воздействия на образец.

Дальнейшие исследования показали, что бомбардировка кристаллов CdS в течение большей продолжительности (до нескольких минут) при тех же энергиях ионов, приводит к росту ФЧ, а также темнового тока на 3 – 4

порядка величины которые не значительно снижаются при выдержке образца в темноте в течение нескольких суток.

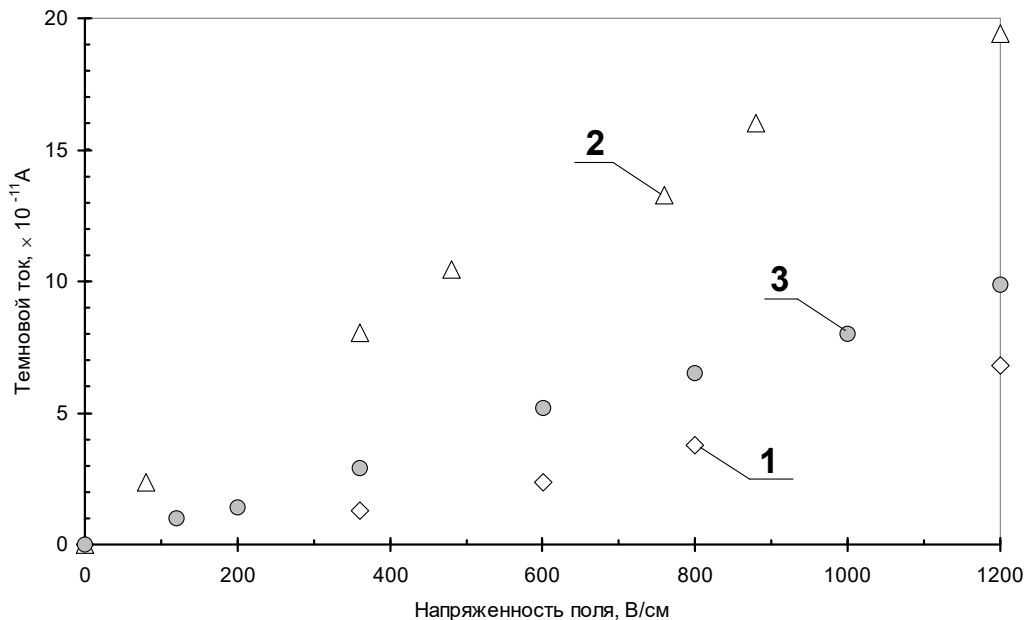


Рис. 2. - Вольт-амперная характеристика образца БМ-Л кристалла CdS до (данные 1), после бомбардировки ионами в вакууме (данные 2) и после выдержки кристалла при нормальных условиях

Обсуждение результатов

Известно, что спектральное распределение ФП полупроводников в значительной степени определяется, не только примесной и дефектной подсистемой кристалла [9], но и условиями на его поверхности [10]. К такому можно отнести наличие на поверхности дефектов, окисного слоя, неоднородностей, чужеродных атомов и т.д., которые могут играть роль рекомбинационных центров [8]. При этом за счет хемосорбции, поверхность полупроводника может заряжаться [6], что приводит к зависимости спектральных кривых ФП кристаллов от зарядового состояния поверхности [7]. Особенно сильно, поверхностные условия оказывают влияние на коротковолновую область спектра, формируемую межзонными

электронными переходами. В этой области свет поглощается в тонком приповерхностном слое, т.к. коэффициент поглощения для полупроводников с прямозонной структурой имеет достаточно высокое значение. Так, например, для кристаллов CdS коэффициент поглощения в области межзонных переходов достигает значений $\alpha \sim 10^5 \text{ см}^{-1}$.

Наблюдаемые в эксперименте изменения связываются с понижением поверхностной концентрации чужеродных атомов, играющих роль центров поверхностной рекомбинации, за счет их выбивания с поверхности кристалла ионами аргона. Действительно, энергия ионов составляла около 1 кэВ, что вполне достаточно для очистки поверхности кристалла от связанных с ней чужеродных атомов и вероятного удаления верхних слоев приповерхностного слоя полупроводника [1]. Понижение концентрации центров поверхностной рекомбинации создает условия для формирования высокой ФЧ кристалла в спектральной области фундаментального поглощения. Согласно полученным результатам, ионная бомбардировка привела к появлению высокой ФЧ кристалла выше края собственного поглощения (кривая 2) и её возрастанию с уменьшением длины волны излучения. Поскольку вероятны процессы выбивания чужеродных атомов, но и также возможен процесс образования на поверхности полупроводника и в приповерхностной области собственно-дефектных центров донорного типа. Рост числа донорных центров вблизи поверхности и на поверхности полупроводника ведет к формированию обогащающего загиба зон в приповерхностной области кристалла CdS [4]. Такой индуцируемый ионами аргона обогащающий изгиб является причиной роста как фототока в собственной области спектра, так и темновой проводимости исследуемого полупроводника. Вполне вероятно, что указанные процессы воздействия ионов газа на поверхность образца действуют одновременно.

Выдержка кристалла CdS в воздушной атмосфере, вероятно, должно сопровождаться возвращением атомарной структуры поверхности к исходному состоянию, т.е. к постепенному росту концентрации примесных атомов, например атомарного и молекулярного кислорода, на поверхности исследуемого кристалла. Рост концентрации центров поверхностной рекомбинации, в свою очередь, должно приводить к падению ФЧ полупроводника в коротковолновой области спектра выше края поглощения, а также его темновой проводимости. Такое поведение спектров ФП и наблюдалось в эксперименте.

Согласно [1] ионная бомбардировка полупроводников приводит к созданию приповерхностных структурных дефектов в кристаллической решетке, имплантации атомов аргона в исходный материал и т.д., что, в целом, приводит к спаду ФЧ полупроводника в краевой области спектра. Однако, это происходит при высоких энергиях ионов (до 100 кэВ), а также при длительных облучениях кристалла (порядка десятков минут). При не слишком больших энергиях ионов (до 1 кэВ) и малодозовой бомбардировке, дефектообразующий эффект значительно снижается. Вполне вероятно, что наблюдаемые в эксперименте спектральные изменения ФП связаны лишь с удалением окисного слоя и примесей, исходно присутствовавших на поверхности полупроводника, что в целом, понизило концентрацию рекомбинационных центров на поверхности исследуемого кристалла CdS. Также, вполне вероятны процессы образования собственно-дефектных центров донорного типа на поверхности кристалла под воздействием ионной бомбардировки. Например, рост темновой проводимости в кристаллах кремния после ионно-аргонной бомбардировки с энергиями менее 1 кэВ также наблюдали авторы [5].

Литература

1. Аброян И.А. Влияние ионной бомбардировки на физические свойства полупроводников // УФН. 1971. 104; 1. с. 15 – 50.
 2. Kim J.C., Ji J.Y., Kline J.S., Tucker J.R., Shen T.C. Preparation of atomically clean and flat Si (100) surfaces by low-energy ion sputtering and low-temperature annealing // Applied Surface Science. 2003. 220. pp. 293 – 297.
 3. Киселев В.А., Новиков Б.В., Чередниченко А.Е. Экситонная спектроскопия приповерхностной области полупроводников. СПб.: СПбГУ, 2003. 244 с.
 4. Bragagnolo J.A., Wright C. and Böer K.W // Phys. Stat. Sol.(a), 1974, v. 24, pp. 147 – 158.
 5. Поплавский А.И., Колпаков А.Я., Галкина М.Е., Суджанская И.В., Гончаров И.Ю., Бондарева Е.Н. Влияние низкоэнергетической ионной бомбардировки аргоном и азотом на свойства кремния // Белгород: БелГУ. Научные ведомости. Серия: Математика, Физика. № 23 (142). Вып. 29. 2012. с. 177 – 183.
 6. Волькенштейн Ф.Ф. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции. М.: Наука, 1987. 432 с.
 7. Батырев А.С., Бисенгалиев Р.А., Новиков Б.В., Шивидов Н.К. Эффекты поверхностного прилипания неравновесных носителей в спектрах фотопроводимости кристаллов CdS // ЖТФ, 2013, т. 83, вып. 9, с. 20 – 23.
 8. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука. 1977, 672 с.
 9. Бьюб Р.Х. Фотопроводимость твердых тел. М.: Издательство иностранной литературы. 1962, 558 с.
 10. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985, 392 с.
-

References

1. Abroyan I.A. UFN. 1971. 104; 1. pp. 15 – 50.
2. Kim J.C., Ji J.Y., Kline J.S., Tucker J.R., Shen T.C. Applied Surface Science. 2003, 220, pp. 293 – 297.
3. Kiselev V.A., Novikov B.V., Cherednichenko A.E. Eksitonnaya spektroskopiya pri poverhnostnoy oblasti poluprovodnikov [Exciton spectroscopy of the surface region of semiconductors]. S.-Pb.: SPbGU, 2003. 244 p.
4. Bragagnolo J.A., Wright C. and Böer K.W. Phys. Stat. Sol.(a), 1974, v. 24, pp. 147 – 158.
5. Poplavskiy A.I., Kolpakov A.Y., Galkina M.E., Sudzhanskaya I.V., Goncharov I.Y., Bondareva E.N. Belgorod: BelgGU. Nauchnie vedomosti. Seria: Matematika, Fizika. 2012, № 23 (142). 29, pp.177 – 183.
6. Wolkenstein F.F. Elektronnie protsessi na poverhnosti poluprovodnikov pri hemosorbtsii [Electronic processes on the surface of semiconductors during chemisorption]. M.: Nauka, 1987. 432 p.
7. Batyrev A.S., Bisengaliev R.A., Novikov B.V., Shividov N.K. Journ. of Tech. Phys., 2013, vol. 83. 9, pp. 20 – 23.
8. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. Fizika poluprovodnikov [Semiconductor physics]. M.: Nauka, 1977. 672 p.
9. Bube R.H. Fotoprovodimost tverdiy tel [Photoconductivity of solids]. M.: Izdatelstvo inostrannoy literaturi. 1962, 558 p.
10. Shalimova K.V. Fizika poluprovodnikov [Semiconductor physics]. M.: Energoatomizdat, 1985. 392 p.