

УДК 621.382.032.21

А.И. Казимиров, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян

Исследование гетероструктур на основе слоев с широкой запрещенной зоной

Исследованы гетероструктуры на основе широкозонных материалов. Обнаружены необычные вольт-амперные характеристики для одиночных и двойных наногетероструктур.

Ключевые слова: диоксид кремния, модифицированный углеродом диоксид кремния; гетероструктуры, ВАХ, кулоновская лестница.

Одними из основных вопросов нанотехнологии являются изучение и разработка способов получения наноструктур, исследование их свойств и возможностей применения в условиях современного мира. Особое внимание уделяется развитию нанoeлектроники, как основе научно-технического прогресса. Исследование электрических и оптических свойств наноразмерных слоев различных материалов и структур на их основе для создания приборов нового поколения является не только актуальной научной проблемой, но и важной практической задачей.

По мнению нобелевского лауреата Ж.И. Алферова, современную физику твердого тела трудно представить без гетероструктур [1]. Особое внимание в обзоре уделено проблеме поиска новых широкозонных материалов для создания приборных гетероструктур.

Целью настоящей работы является сообщение о полученных результатах по созданию и исследованию гетероструктур на основе нанослоев $\text{SiO}_2\text{-SiO}_2^M$, где SiO_2^M – это модифицированный слой диоксида кремния.

Исследованию подвергались пленки диоксида кремния, полученные методом магнетронного распыления кремниевой мишени в атмосфере кислорода при давлении $(4 \times 6) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. при разрядном токе 200 мА и напряжении разряда 300 В. Расстояние мишень–подложка 50 мм. Пленки модифицированного диоксида кремния получались путем распыления комбинированной мишени, состоящей из кремния и графита в атмосфере кислорода с добавлением аргона. Подробно техника нанесения слоев SiO_2 и SiO_2^M описана в [2].

Ширину оптической щели для исследуемых пленок определяли оптическим методом с помощью спектрометра USB2000 путем экстраполяции к нулю зависимости квадрата коэффициента поглощения от энергии фотонов. Толщину пленок измеряли с помощью интерферометра МИИ-4М и метода, включающего совместное применение ИК-спектрометра Infracalum FT-801 и спектрометра USB2000.

В рассматриваемой работе представлены следующие проведенные нами исследования и полученные результаты:

- определение ширины оптической щели ΔE для пленок диоксида кремния и ее зависимости от толщины пленок SiO_2 d_{SiO_2} ;
- исследование влияния количества углеродных включений в составе комбинированной мишени на величину ΔE пленок SiO_2^M ;
- измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) пленок SiO_2 в структуре Al- SiO_2 -Al, а также ВАХ структур Al- SiO_2 - SiO_2^M -Al и Al- SiO_2 - SiO_2^M - SiO_2 -Al.

Зависимость ширины оптической щели пленки SiO_2 от ее толщины

При исследовании пленок SiO_2 , полученных магнетронным распылением кремниевой мишени в вакуумной системе с паромасляными наносами, установлено, что для пленок толщиной от 20 до 100 нм ΔE практически постоянна и составляет $5,6 \pm 0,1$ эВ (рис. 1).

В то же время достоверно установлено, что в области толщин менее 20 нм ΔE уменьшается, достигая при $d_{\text{SiO}_2} = 10$ нм значения 4,6 эВ, а при толщине ~5 нм резко возрастает, достигая значения 6,0 эВ.

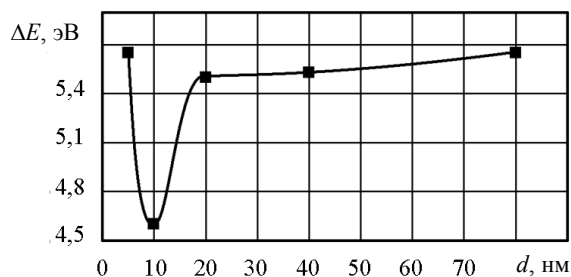


Рис. 1. Зависимость ΔE пленок SiO_2 от d_{SiO_2}

Зависимость ширины оптической щели пленок SiO_2^M от количества углеродных включений в распыляемую мишень

В работе [2] было показано, что при распылении составной мишени Si-C формируются пленки, свойства которых существенно отличаются от пленок чистого SiO_2 . Такие пленки мы назвали модифицированными и обозначим SiO_2^M . Для количественной характеристики степени модификации вводится параметр S_c , означающий процент площади, занимаемой графитом в составной мишени. Методика оценки ΔE пленок с помощью спектрометра USB2000 описана в [3] и пример ее реализации представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлена зависимость ΔE от значения S_c .

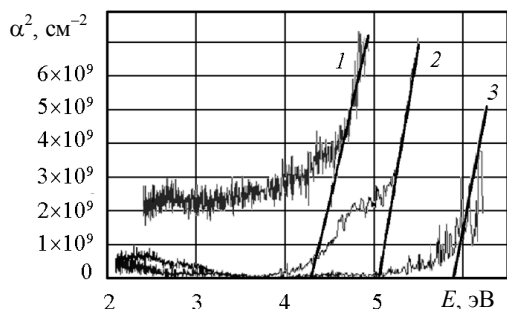


Рис. 2. Графики зависимостей квадрата коэффициента поглощения от энергии падающего света для пленок SiO_2 при:
1 – $S_c=80\%$; 2 – $S_c=30\%$;
3 – $S_c=0\%$

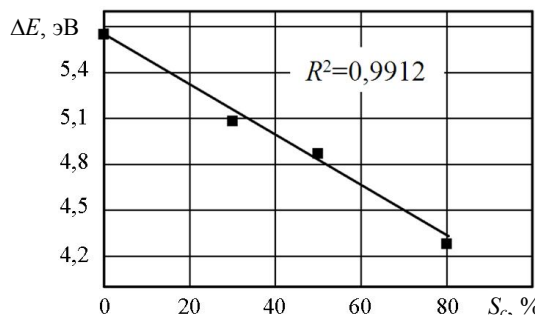


Рис. 3. Зависимость ΔE пленок SiO_2^M от параметра S_c

Вольт-амперные характеристики пленок SiO_2

ВАХ снимались на постоянном напряжении в структурах с алюминиевыми электродами при положительной полярности на верхнем электроде. Толщина исследуемых слоев при измерении ВАХ составляла 80 нм.

На рис. 4 представлена ВАХ для структуры Al- SiO_2 -Al. Видно, что характеристика имеет типичный для подобных структур вид и связана с процессами на контакте (эффект Шотки) и в объеме (эффект Пула-Френкеля).

ВАХ структур Al- SiO_2 - SiO_2^M -Al представлена на рис. 5, а и существенно отличается от ВАХ структур Al- SiO_2 -Al. Отличие заключается в том, что ВАХ носит ступенчатый характер, а значения токов более чем на порядок меньше.

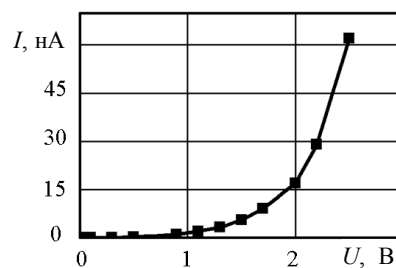


Рис. 4. ВАХ структур Al- SiO_2 -Al

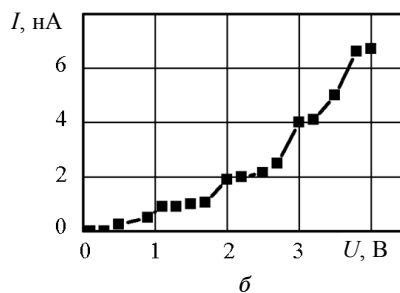
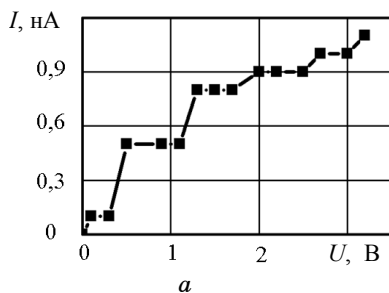


Рис. 5. ВАХ структур: а – Al- SiO_2 - SiO_2^M -Al; б – Al- SiO_2 - SiO_2^M - SiO_2 -Al

Наконец, на рис. 5, б представлена ВАХ структуры Al- SiO_2 - SiO_2^M - SiO_2 -Al, которая отличается по виду от ВАХ для структур Al- SiO_2 -Al и Al- SiO_2 - SiO_2^M -Al. Полученные характеристики говорят о наличии эффекта квантования.

Обсуждение результатов хотелось бы начать с замечания о том, что подобные исследования ранее не проводились и, соответственно, и результаты подобного вида никем ранее не представлялись. По-видимому, нам впервые удалось получить гетероструктурные наносистемы на основе широкозонных материалов. В этой связи глубокого обсуждения результатов вряд ли можно ожидать на данном этапе работы.

Известно, что при введении углерода в пленку SiO_2 происходит ее «разрыхление», вызванное протеканием реакции $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}_2$ на этапе образования пленки. Выделяющаяся газовая компонента приводит к образованию пор в пленке и уменьшению ее плотности [4]. Образование несвязанного кремния в пленке SiO_2 приводит к размытию края энергетических зон и уменьшению ширины оптической щели.

Объяснение вида ВАХ и характера процессов в структурах $\text{Al-SiO}_2\text{-SiO}_2^{\text{M-SiO}_2\text{-Al}}$ и $\text{Al-SiO}_2\text{-SiO}_2^{\text{M-Al}}$ достаточно сложная задача, поскольку характеристики подобного вида для диэлектрических слоев ранее никто не наблюдал. Если применить формальный подход, то можно по аналогии с ВАХ структур с туннельными переходами, описанной в [5], говорить о том, что для структур $\text{Al-SiO}_2\text{-SiO}_2^{\text{M-Al}}$ мы наблюдали «кулоновскую лестницу», связанную с наличием эффектов одноэлектронного туннелирования. Более глубокое понимание процессов электропроводности в исследуемых наноструктурах должно базироваться на существовании в них одного или двух гетеропереходов из широкозонных материалов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07 сентября 2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. – 1988. – Т. 32, № 1 – С. 3–18.
2. Сахаров Ю.В. Влияние примеси углерода на формовку и электрофизические параметры МДМ-структур: Дис. ... канд. техн. наук. (Томск), 2006. – 150 с.
3. Казимиров А.И. Свойства плёнок диоксида кремния, модифицированных углеродом / А.И. Казимиров, Л.С. Михайленко, Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян // Становление и развитие научных исследований в высшей школе: сб. трудов Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2009. – Т. 1. – С. 339–344.
4. Троян П.Е. Физико-химические процессы в пленках диоксида кремния в сильных электрических полях // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 12. – С. 70–73.
5. Лозовский В.Н. Нанотехнология в электронике: учебн. пособие / В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. – СПб.: Лань, – 2008. – 336 с.

Казимиров Артем Игоревич

Магистрант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-923-407-93-64
Эл. почта: tpe@ms.tusur.ru

Сахаров Юрий Владимирович

Канд. техн. наук, доцент каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-923-408-06-76
Эл. почта: suv@ms.tusur.ru

Троян Павел Ефимович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-913-110-22-11
Эл. почта: tpe@ms.tusur.ru

Kazimirov A.I., Sakharov Yu.V., Trojan P.E.

An investigation of heterostructures based on large-gap material layers

The heterostructures based on large-gap material layers have been investigated. For the case of single and double nano-heterostructures, anomalous current-voltage characteristics have been found.

Keywords: silicon dioxide, silicon dioxide modified with carbon, heterostructures, current-voltage characteristics, Coulomb staircase.