УДК 621.382

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОКА ОБРАЗЦОВ ИЗ КРЕМНИЯ СО СЛОЕМ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

3.0. МХИТАРЯН, А.А. ШАТВЕРЯН, А.С. СТЕПАНЯН, Х.С. МАРТИРОСЯН, В.М. АРУТЮНЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 7 июля 2004 г.)

Измерены статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов из монокристаллического Si *n*-типа со слоем PS в электролите в области температур 250–320К. На прямой ветви ВАХ наблюдается гистерезис, на обратной ветви гистерезиса нет. Имеющее место затягивание включения исследуемых образцов из обратного в пропускное связано с процессами на межфазной границе полупроводник – электролит. Прямая ветвь ВАХ при *T* = 300К аппроксимируется экспоненциальной зависимостью тока от напряжения. Получено, что при опускании образца в электролит коэффициент неидеальности уменьшается. В области фазового перехода электролита обнаружен скачок проводимости при повышении температуры.

1. Введение

В связи с большими перспективами широкого практического применения в последние годы интенсивно изучается пористый кремний (PS) [1-3]. Значительный интерес представляет исследование электрических характеристик структур со слоем PS, позволяющее определять специфику тока, а также параметры исследуемых образцов [1,2,4,5]. В настоящей работе приводятся результаты исследования статических вольт-амперных характеристик (BAX) структур из монокристаллического кремния со слоем PS в электролите при различных температурах, а также температурные зависимости тока для свежеизготовленных и «состаренных» образцов.

2. Методика эксперимента

Исследуемые образцы представляли собой слои PS, изготовленные на монокристаллическом кремнии *n*-типа. Гравиметрическими и оптическими методами определялась пористость (60%) и толщина (1,5 мкм) слоя PS. В проведенных исследованиях PS контактировал с электролитом, представляющим собой раствор NaCI в дистиллированной воде. В качестве контрэлектрода (КЭ) использовалась тонкая пластина из платины или золота с сереб-

ряным выводом. Тыльная сторона исследуемых образцов перед погружением в электролит защищалась химически стойким лаком. Электрохимическая ячейка с образцом охлаждалась в парах жидкого азота до -40°С, а затем медленно нагревалась до комнатной температуры. После установки каждой температуры до начала измерений образцы выдерживались 2 часа. Температура образца измерялась термопарой, прижатой к образцу.

Использовались свежеизготовленные и состаренные образцы. Состаренные – это образцы, хранившиеся в воздухе при нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре 2–3 месяца.

При измерениях ВАХ использовалась стандартная методика: на образец подавалось напряжение с аккумуляторных батарей, которое менялось с шагом 0,1 В. Контроль напряжения осуществлялся вольтметром DT-830B. Интервал используемых напряжений 0–30 В. Ток через образец измерялся миллиамперметром M-254.

3. Электрические характеристики

Как показали измерения, статические ВАХ образцов с подложкой из монокристаллического кремния *n*-типа с твердотельным контактным слоем (ТК) из золота или алюминия аналогичны ВАХ образцов с подложкой из Si *p*-типа с ТК, приведенными в [6], т.е. имеет место выпрямление, причем прямая ветвь имеет вид экспоненты с коэффициентом неидеальности $\beta \approx 20$, а на обратной ветви насыщение отсутствует. На рис.1 приведены ВАХ образцов с жидким электродом, представляющим из себя электролит, при температурах 250К и 320К, соответственно. Как видно из графиков, и в этом случае ВАХ имеют выпрямляющий вид, причем прямая ветвь содержит в области малых напряжений (до 5В) гистерезисную петлю малой площади. На обратной ветви гистерезиса нет. В исследованном диапазоне температур ток





при малых прямых смещениях незначительно растет, затем с повышением напряжения резко возрастает, причем чем больше температура, тем ближе эта ветвь к вертикали, а обратная ветвь с повышением температуры приобретает больший наклон. При внешнем нулевом смещении через систему исследуемый образец – электролит – контрэлектрод течет обратный ток порядка 30 мкА, что связано с наличием разности потенциалов, которая возникает между разнородными электродами, опущенными в электролит. Смена направления тока с обратного на пропускное происходит при U = 0.32 В.



Рис.2. Зависимость тока от температуры для образцов N1.



Рис.3. Зависимость тока от температуры для образцов N2.

На рис.2 и 3 приведены зависимости тока от температуры для свежеизготовленных (N1) и «состаренных» (N2) образцов, соответственно. Видно, что в области температур $-6^{\circ}C - -1^{\circ}C$ для образцов N1 (рис.2) и N2 (рис.3) имеет место скачок проводимости. Причем для образцов N2 проводимость возрастает более резко. Для некоторых «состаренных» образцов наблюдается аномальная зависимость тока от температуры (рис.4). Из рисунков видно, что температура замерзания электролита (температура фазового перехода электролита из жидкого состояния в твердое) ниже 0°С. Причина этого в том, что температура плавления нанокристаллов льда (кристаллов льда, имеющих размеры, равные размерам нанопор) ниже, чем у макрокристаллов [7]. В работе [8] график зависимости тока от температуры через систему, содержащую «состаренный» образец, похожий на наш, содержит в области фазового перехода максимум. Различие в полученных результатах, возможно, связано с тем, что поверхность пор в образцах, исследованных в [8], термически окислялась специальным технологическим циклом, а в наших образцах окисление поверхности пор происходило в естественных условиях.





4. Обсуждение результатов

Выпрямляющий вид ВАХ образцов в электролите определяется наличием барьера, т.е. слой PS в исследуемых образцах – тонкий [2], но в отличие от ВАХ структур с ТК, имеющих четко выраженный выпрямляющий вид, при подаче прямого смещения имеет место затягивание включения структуры в пропускной режим. Похожее поведение наблюдается, когда вместо структур со слоем PS в электролит помещается монокристаллический Si. Это означает, что в формировании начального участка ВАХ решающую роль играют процессы на межфазной границе электролит – полупроводник, представляющий собой монокристаллический Si со слоем PS или без него.

Прямая ветвь ВАХ при T = 300К аппроксимируется экспоненциальной зависимостью тока от напряжения $I = B(\exp qU/\beta kT - 1)$, где I – ток через систему, q – элементарный заряд, U – напряжение, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, B – коэффициент пропорциональности,

определяемый из эксперимента ($B = 2,3\,10^{-8}$ A). Наилучшее совпадение с экспериментальной кривой обеспечивает расчетная экспонента с $\beta = 15$. Таким образом, получено, что при опускании образца в электролит коэффициент неидеальности β уменьшается. Известно, что сопротивление слоев PS, пропитанных электролитом, на несколько порядков меньше, чем сопротивление сухого слоя PS [9]. Это объясняется тем, что электролит, пропитывая PS, шунтирует нанокристаллиты, но, как мы полагаем, не полностью, поскольку, во-первых, поверхность пор в основном гидрофобна, и, во-вторых, вследствие малости размеров нанопор они заполняются электролитом не до конца. С учетом того, что β пропорционален сh(*W/L*), где *W* – толщина слоя PS, *L* – длина диффузионного смещения [10], его уменьшение в электролите можно объяснить некоторым уменьшением *W* из-за шунтирования приповерхностной части нанопор электролитом и увеличением *L* из-за уменьшения концентрации рекомбинационных центров.

Более резкий рост тока в зависимости от температуры в области фазового перехода у образцов N2 по сравнению с образцами N1 мы объясняем так: поверхность нанопор свежеизготовленных образцов покрыта гидридными группами и поэтому гидрофобна. Со временем часть водорода заменяется кислородом, и поэтому поверхность пор становится более гидрофильной. При увеличении температуры лед начинает плавиться и при этом расширяется, т.к. имеет в нанопорах двумерную гексагональную структуру [11]. Поэтому при таянии электролит увеличивается в объеме и заполняет поры образцов. Поры «состаренных» образцов (N2) заполняются больше, чем поры свежеизготовленных, поскольку поверхность первых более гидрофильна. Поэтому в «состаренных» образцах появляется больше каналов протекания тока, и проводимость изменяется сильнее.

5. Заключение

Анализ ВАХ структур n-Si/PS – электролит – ТК (из благородного металла) в области температур 250–320К показал наличие выпрямления. Имеющее место затягивание включения исследуемых образцов из обратного в пропускное связано с процессами на межфазной границе полупроводник – электролит. Оценки показали, что при опускании образца в электролит коэффициент неидеальности уменьшается. Прямая ветвь ВАХ содержит в области малых напряжений (до 5 В) гистерезисную петлю малой площади. На обратной ветви гистерезиса нет. В области фазового перехода электролита обнаружены особенности токопереноса – резкое возрастание проводимости при повышении температуры. Для «состаренных» образцов степень возрастания проводимости больше, чем для свежеизготовленных, что объясняется изменением состояния поверхности пор со временем.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. A.G.Cullis, L.T.Canham, P.Caicott. J. Appl. Phys., 82, 909 (1997).
- S.Ossicini, L.Pavesi, F.Priolo. Light Emitting Silicon for Microphotonics. Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- D.J.Lockwood, L.Pavesi. Silicon Photonics, In : Topics Appl. Phys., 94, 392. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- 4. M.Zh.Ghulinyan, V.M.Aroutiounian. Phys. Stat. Sol. (a), 197, 419 (2003).
- 5. V.M.Aroutiounian, M.Zh.Ghulinyan. Ibid., k62.
- 6. З.О.Мхитарян, А.А.Шатверян, А.З.Адамян, В.М.Арутюнян. Изв. НАН Армении, Физика, 39, 173 (2004).
- 7. J.H.Bilgram. Phys. Rep., 153, 1 (1987).
- Е.Н.Лукьянова, С.Н.Козлов, В.М.Демидович, Г.Б.Демидович. Письма в ЖТФ, 27, №11, 1 (2001).
- 9. д. Порячев, Г.Полисский, О.М.Сретели. ФТП, 34, 227 (2000).
- 10. С.В.Слобо, ччиков, Д.Н.Горячев, Х.М.Салихов, О.М.Сретели. ФТП, 3, 340 (1999).
- 11. M.Odelius, M. Bernasconi, M. Parinello. Phys. Rev. Lett., 78, 2855 (1997).

ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՍԻԼԻՅԻՈՒՄԻ ՇԵՐՏ ՈՒՆԵՅՈՂ ՆՄՈՒՇՆԵՐԻ ՎԱԲ-Ը ԵՎ ՀՈՍԱՆՔԻ ՋԵՐՍՀՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԿԱԽՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐՈԼԻՏՈՒՄ

2.4. ՄԽԻԹԱՐՅԱՆ, Ա.Ա. ՇԱՏՎԵՐՅԱՆ, Ա.Ս. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Խ.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Չափված են ծակոտկեն սիլիցիումի շերտ ունեցեղ մոնոբյուրեղային *n*-տիպի սիլիցիումից պատրաստված նմուշների ՎԱԲ-երը Էլեկտրոլիտում 250–320Կ ջերմաստիճանային տիրույթում։ Փոքր ուղիղ շեղումների տիրույթում ՎԱԲ-ի ճյուղի վրա հայտնաբերված է հիստերեզիս, իսկ հակադարծ ճյուղի վրա այն բացակայում է։ Ստացված է, որ նմուշների ՎԱԲ-ը ունի ուղղիչ տեսք և ուղիղ ճյուղում այն լարումը, որի դեպքում սկսում է թողարկումը, մեծանում է։ Դա բացատրվում է կիսահաղորդիչ – էլեկտրոլիտ բաժանման սահմանի վրա տեղի ունեցող պրոցեսներով։ ՎԱԲ-ի ուղիղ ճյուղը 7=300Կ ջերմաստիճանում ապրոքսիմացվել է հոսանքի էքսպոնենցիալ կախումով լարումից։ Էլեկտրոլիտի փուլային անցման տիրույթում հայտնաբերվել է, որ էլեկտրահաղուսկանությունը ջերմաստիճանից կախված կտրուկ աճում է։

CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS AND TEMPERATURE DEPENDENCES OF CURRENT OF SILICON SAMPLES WITH A LAYER OF POROUS SILICON IN ELECTROLYTE

Z.H. MKHITARYAN, A.A. SHATVERYAN, A.S. STEPANYAN, KH.S. MARTIROSYAN, V.M. AROUTIOUNIAN

The static CVC of samples made of single crystal silicon of *n*-type with a layer of porous silicon (PS) are measured in electrolyte at temperatures 250-320K. We observe the hysteresis only on the direct branch of CVC. Measurements of the current temperature dependence reveal that with the temperature increase in the low-temperature region the conductivity grows monotonously; but in the region of the temperature of phase transition of the electrolyte the conductivity sharply grows.