

06.1;06.2

Гистерезис вольт-амперных характеристик светоизлучающих структур на пористом кремнии

© А.Н. Лаптев, А.В. Проказников, Н.А. Рудь

Ярославский государственный университет

Поступило в Редакцию 27 ноября 1996 г.

В работе описан новый гистерезисный эффект в структурах Me-ПК-*p*-Si и предлагается новая модель описания токопрохождения в таких структурах.

Пористый кремний стал рассматриваться как весьма перспективный материал оптоэлектроники после обнаружения в нем интенсивной фотолюминесценции в видимой области спектра [1], а также электролюминесценции структур с его использованием [2]. Однако до настоящего времени квантовая эффективность электролюминесценции структур с пористым кремнием остается достаточно низкой (не более 10^{-3}), поэтому для повышения этого параметра важно существенно улучшить понимание особенностей физических процессов при протекании тока в электролюминесцентных ячейках, в том числе и структурах типа металл (Me)-пористый кремний (ПК)-кристаллический кремний (*c*-Si).

В данной работе представлены результаты исследования токопрохождения и фоточувствительности в диапазоне длин волн 0.4–1.3 мкм светоизлучающих структур Pd-ПК-*p*-Si при комнатной температуре.

Для создания исследуемых структур на основе пористого кремния использовались пластины *p*-Si (КДБ-10) с ориентацией (100). Слои пористого кремния получены методом анодной электрохимической обработки в 50%-ном водном растворе HF. Данная методика позволяла получать слои пористого кремния в несколько мкм. Для удаления поверхностной аморфизированной пленки на образцах проводилась плазмохимическая обработка поверхности пористого кремния. Поверхность пористого кремния покрывалась полупрозрачным слоем Pd (толщиной 20 нм). В качестве омических контактов использовался слой Al толщиной в несколько мкм, который частично покрывал слой Pd и наносился на тыльную сторону кристаллического кремния (см. вставку, рис. 1).

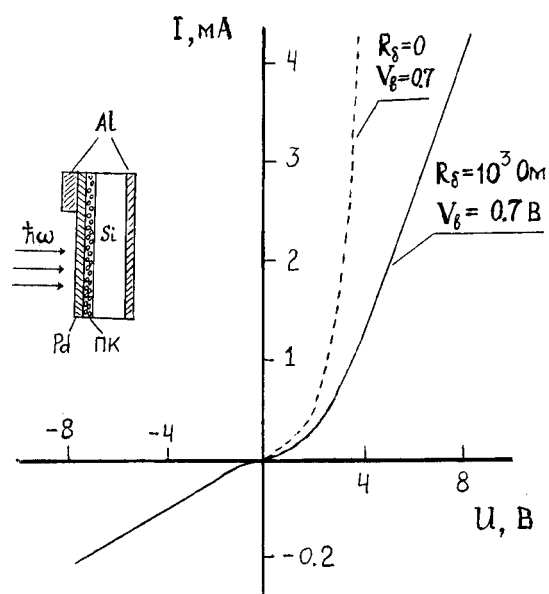


Рис. 1. Типичная статическая вольт-амперная характеристика структур Pd-ПК-*p*-Si (а) и общий вид этих структур (б).

Статические вольт-амперные характеристики исследованных структур имели четко выраженный выпрямляющий характер. Отношение токов в прямом и обратном направлениях (прямому направлению тока соответствовала подача положительного потенциала на *c*-Si) при смещении 2 В изменялось от образца к образцу от нескольких единиц до 10^2 . Типичные вольт-амперные характеристики наших структур представлены на рис. 1. Следует отметить, что для всех структур не наблюдалось насыщения обратного тока. Более того, для большинства структур обратный ток линейно нарастал с увеличением смещения. В работах [3,4] при исследовании вольт-амперных характеристик структур Al-ПК-*p*-Si также отмечалось отсутствие насыщения обратного тока. Авторы этих работ анализировали свои результаты в рамках модели двух барьеров (барьера Шоттки на контакте Al-ПК и гетероперехода на границе ПК-*p*-Si), включенных навстречу друг другу. В наших структу-

рах эта модель, по-видимому, не может быть использована, поскольку не ясен вопрос о реализации выпрямляющего контакта на границе Pd–ПК. Если считать, что в наших структурах пористый кремний имеет p -тип проводимости, то по условиям простой модели, не учитывающей влияние электронных состояний на границе раздела, контакт Pd–ПК является омическим, в то время как Al–ПК — выпрямляющим. По этой причине мы полагаем, что вольт-амперные характеристики наших структур будут определяться изотипным p – p гетеропереходом между кристаллическим p -Si и более широкозонным пористым кремнием [5]. Отметим, что свойства этого гетероперехода практически не исследованы. Однако известно [6], что в зависимости от уровня легирования исходных полупроводниковых материалов и наличия заряженных состояний на границе диаграммы энергетических зон и вольт-амперных характеристик изотипных гетеропереходов существенным образом изменяются. Как показано в [6], n – n гетеропереходы Ge–Si при концентрации доноров в Si 10^{14} см $^{-3}$, а в Ge $5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ обладают вольт-амперными характеристиками, которые подобны экспериментальным данным наших структур. Следуя [7], ток через изотипный гетеропереход обусловлен термоэлектронной эмиссией в противоположных направлениях носителей заряда и определяется следующим выражением:

$$J = J_0(1 - V_B) [\exp(qU/kT) - 1], \quad (1)$$

где V_B — барьерный потенциал гетероперехода, а для J_0 следует соотношение

$$J_0 = qA^*TV_B \exp(-qV_B/kT)/k. \quad (2)$$

В этом случае обратный ток гетероперехода не имеет насыщения, а при больших значениях U ($qU \gg kT$) линейно возрастает. В прямом направлении зависимость тока от qU/kT допускает аппроксимацию экспоненциальной функцией, т. е. $J \sim \exp(qU/nkT)$.

Анализ вольт-амперных характеристик наших структур, исходя из модели изотипного p – p гетероперехода, показывает, что зависимость обратного тока от смещения хорошо согласуется с выражением (1) при значениях $V_B = 0.7 - 1$ В для различных образцов. Прямая ветвь экспериментальных вольт-амперных характеристик при небольших смещениях с учетом базового сопротивления слоя пористого кремния (600–1000 Ом) экстраполируется экспоненциальной зависимостью $J \sim \exp(qU/nkT)$. Анализ логарифмической зависимости прямого

тока от смещения позволил определить значение V_B и коэффициента неидеальности n для исследованных структур. При значении эффективной постоянной Ричардсона $A^* = 8 \cdot 10^5 \text{ Ам}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ [7] значение V_B варьировалось в области 0.6–0.8 В при коэффициенте неидеальности $n = 8–14$. Такие же значения фактора неидеальности вольт-амперных характеристик структур Me–ПК–*p*–Si отмечались в работах [2,3,8,9]. Авторы этих работ связывают это обстоятельство с высокой концентрацией локализованных электронных состояний на границе Me–ПК. В рамках нашей модели для исследованных структур мы полагаем, что на повышение коэффициента неидеальности n существенно влияют как высокая концентрация локализованных электронных состояний в пористом кремнии, так и его неоднородность.

Присутствие локализованных электронных состояний в пористом кремнии может влиять на процесс установления тока через структуру. Для выявления этого влияния нами были проведены исследования динамических вольт-амперных характеристик структур при периодическом линейно изменяющемся смещении. Было установлено, что вид динамической вольт-амперной характеристики зависит от скорости изменения смещения на структуре. При частотах повторения $< 5 \cdot 10^{-3}$ Гц для всех образцов наблюдался отчетливый гистерезис на прямой и обратной ветвях вольт-амперной характеристики. На рис. 2 представлена типичная динамическая вольт-амперная характеристика наших структур, полученная при частоте повторения смещения 10^{-3} Гц.

Анализ динамических характеристик показал, что процесс установления тока через исследованные структуры в прямом и обратном направлениях характеризуется различными временами. Проведенные нами исследования релаксации тока через структуру при импульсном смещении дали возможность определить характерные времена этой релаксации. Нами установлено, что обратный и прямой ток устанавливаются с временами 40 и 13 с соответственно. Это хорошо согласуется с результатами по исследованию гистерезиса вольт-амперных характеристик. Таким образом, выявлено, что наличие глубоких электронных состояний обуславливает гистерезис вольт-амперных характеристик.

Подтверждением нашей модели *p–p* гетероперехода с наличием глубоких электронных состояний в слое пористого кремния служат проведенные нами исследования спектральной фоточувствительности структур при стационарном оптическом возбуждении без смещения. На рис. 3 представлена типичная зависимость фоточувствительности

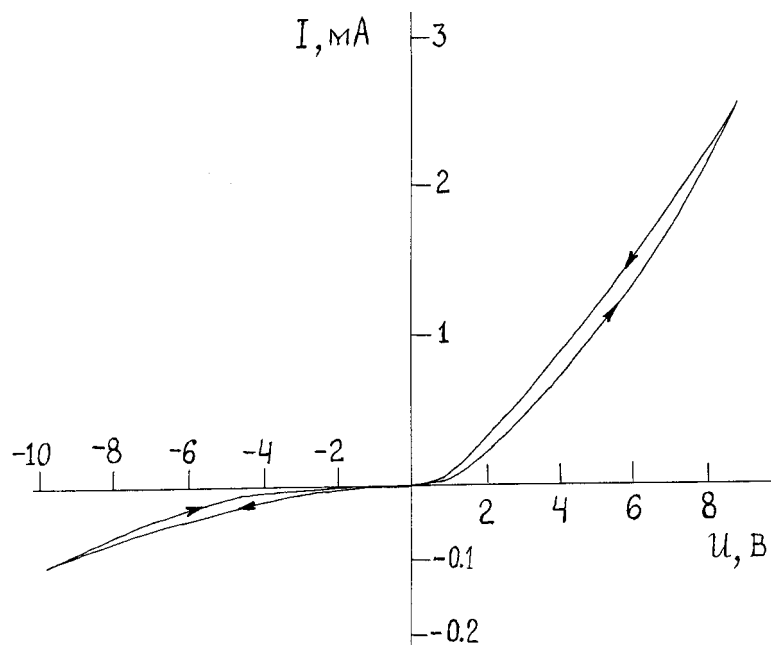


Рис. 2. Динамическая вольт-амперная характеристика структуры Pd-ПК-p-Si.

исследованной структуры, вольт-амперная характеристика которой иллюстрируется на рис. 1, 2. Характерной особенностью для всех исследованных нами структур является наличие разнополярных фотооткликов в различных областях спектра. При этом максимум отрицательного отклика находился практически при одной и той же длине волны для всех исследованных структур. В то же время формы и соотношения положительных и отрицательных откликов несколько изменялись от образца к образцу. Подобные фотоэффекты в $n-n$ гетеропереходах Ge-Si наблюдались в [6]. Следуя этой работе, отрицательный фотоотклик в наших структурах связан с фотовозбуждением в монокремнии, а длинноволновый положительный определяется фотовозбуждением ловушек в пористом кремнии и на его поверхности. Положительный коротковолновый фотоотклик обусловлен суммарным фотоэффектом в ПК и c -Si. Проявление ловушек в подобных структурах отмечалось

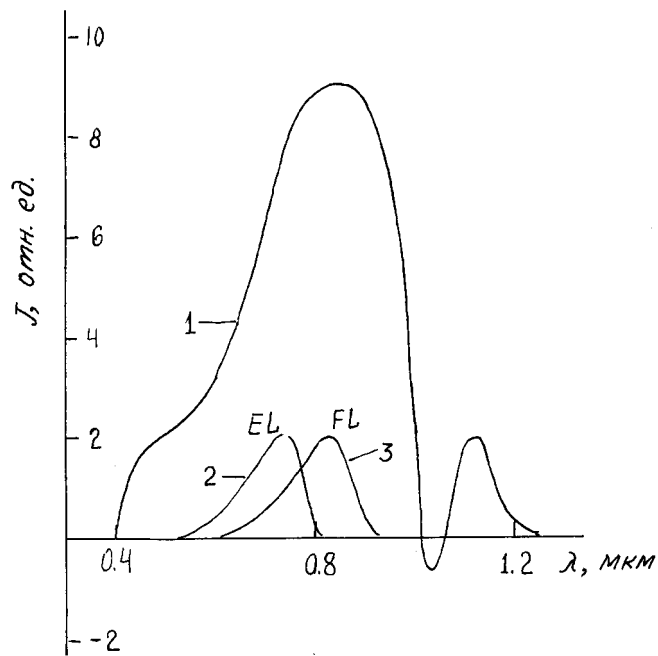


Рис. 3. Спектральные зависимости фотоотклика (1), электролюминесценции (2) и фотолюминесценции (3) структуры Pd-ПК-*p*-Si.

при исследовании фотоиндуцированного захвата заряда в пористом кремнии [10]. Природа этих ловушек может быть связана с E' -центрами в SiO_2 [10], а также с электронными состояниями бора при наличии квантово-размерных эффектов в пористом кремнии.

Таким образом, результаты нашей работы свидетельствуют о том, что при анализе процессов токопрохождения в структурах с Me-ПК-*p*-Si следует учитывать возможность образования изотипного гетероперехода и наличие глубоких электронных состояний в пористом кремнии, играющих роль ловушек для носителей заряда. Показано, что экспериментальные вольт-амперные характеристики структур Pd-ПК-*p*-Si хорошо совпадают с теоретическими зависимостями, полученными на основе модели изотипного *p-p* гетероперехода между монокремнием и пористым кремнием. Наличие гистерезиса в динамических

вольт-амперных характеристиках обусловлено присутствием ловушек для дырок в пористом кремнии, что подтверждается также спектрами фотоотклика исследованных нами структур. Для выяснения природы этих ловушек требуются дополнительные исследования, которые мы планируем провести. В следующем сообщении будут представлены подробные результаты по фотоэффектам на структурах с пористым кремнием.

Авторы признательны С.П. Зимину за полезные дискуссии и Н.Е. Мокроусову за предоставленные образцы.

Список литературы

- [1] *Cancham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046–1048.
- [2] *Koshida N., Koyama H.* // J. Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 3. P. 347–349.
- [3] *Ben-Chorin M., Möller F., Koch F.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. N 2. P. 4482–4488.
- [4] *Зимин С.П., Кузнецов В.С., Перч Н.В., Проказников А.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 22. С. 22–26.
- [5] *Беляков Л.В., Горячев Д.Н., Сресели О.М., Ярошецкий И.Д.* // ФТП. 1993. Т. 27 С. 1815–1819.
- [6] *Милнс А., Фойхт Д.* Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975. 432 с.
- [7] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с.
- [8] *Maruska H.P., Natavar F., Kalkhoran N.M.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. N 11. P. 1338–1340.
- [9] *Dimitrov D.B.* // Phys. Rev. B. 1995. N 3. P. 1562–1566.
- [10] *Матвеева А.Б., Константинова Е.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К.* // ФТП. 1995. Т. 29. С. 2180–2188.