

06:07:12

Электролюминесценция и вольт-амперные характеристики структур на основе пористого кремния *n*-типа

© Э.Ю. Бучин, Н.А. Лаптев, А.В. Проказников, Н.А. Рудь,
В.Б. Световой, А.Н. Чирков

Ярославский государственный университет

Поступило в Редакцию 27 декабря 1996 г.

В работе представлены результаты исследования набора структур на основе пористого кремния *n*-типа, которые обладают высокой эффективностью электролюминесценции и слабо подвержены деградации. Эти результаты показывают, что реально достичь рабочих напряжений, соответствующих стандартам керамика–металл-оксид–полупроводник-технологии.

Одной из нерешенных задач на пути расширения возможностей традиционной кремниевой технологии является создание светоизлучающих приборов с эмиссионной эффективностью, достаточной для практических применений. Пористый кремний является перспективным материалом для разработки таких приборов, так как способен при комнатной температуре преобразовывать подводимую энергию в видимое излучение. В связи с этим большое число работ направлено как на изучение физико-химических свойств этого нового материала, так и на исследования закономерностей его получения [1].

Особый интерес к изучению свойств пористого кремния возник после обнаружения эффективной фотолюминесценции (порядка 10%) в видимом диапазоне длин волн при комнатной температуре [2]. Это открытие вселило надежду на возможность создания светоизлучающих приборов на основе кремниевой технологии. Такие приборы могли бы быть монолитно интегрированы с другими структурами на кремнии и использованы при создании оптических межсоединений и плоских дисплеев. Более важной в плане практического применения является электролюминесценция пористого кремния, когда излучение света возникает под действием протекающего тока. Первые попытки получить электролюминесцентные приборы выявили низкую эффективность элек-

тролюминесценции (порядка $10^{-5}\%$), которой не достаточно для практического использования [3–5]. Эта трудность привела к некоторому спаду интереса к данной тематике, который возобновился в 1995 году, когда появились первые обнадеживающие результаты [6].

Электрофизические свойства структур на основе пористого кремния p -типа, не обладающих электролюминесценцией, изучались в работах [7–9]. В работе [7] изучался транспорт носителей заряда в слоях пористого кремния различной толщины. Показано, что проблема инжекции из контакта может быть решена путем создания достаточно тонкого слоя пористого кремния. В работе [8] показано, что выпрямляющие свойства структур на основе пористого кремния объясняются обеднением в монокремниевой подложке в области перехода пористый кремний–монокремний. В работе [9] изучалась частотная зависимость проводимости и диэлектрической постоянной структур на основе пористого кремния. Обнаруженное на эксперименте поведение объясняется в терминах прыжковой проводимости по фрактальной сетке [9].

В настоящей работе исследовались электролюминесцентные и электрофизические свойства специально приготовленных структур на основе пористого кремния, полученного на подложках типа КЭФ-20. Специальная технология приготовления электролюминесцентных структур затрагивала два важных аспекта: управляемое, воспроизводимое формирование структур с особой морфологией пористой структуры и окончательное создание электролюминесценции структур с помощью лазерной обработки образцов на базе сформированного слоя пористого кремния.

Морфология пористой структуры [10–12] контролировалась выбором рабочей точки на вольт-амперной характеристике процесса анодирования кремния в растворах плавиковой кислоты. В частности, изготавливались структуры со смешанным типом морфологии пористого кремния путем перемещения вольт-амперной характеристики в процессе анодирования. Получающиеся при этом структуры стабильно воспроизводимы с точки зрения морфологии и электролюминесцентные свойства различны для каждого типа морфологии. Задача заключается в формировании таких структур, которые проявляют наибольшую эффективность электролюминесценции. Отметим, что отсутствует корреляция между фотолюминесценцией, уровень которой для наших образцов всегда достаточно высок, и электролюминесцентными свойствами структур на основе этих образцов. На излучающие свойства готовых приборов

влияет не только технология приготовления пористого кремния, но и методы последующей обработки при создании излучающих структур. В этой части задача заключается в оптимизации режимов удаления диэлектрической пленки с поверхности пористого кремния и металла (для открытия выхода излучению) при лазерной обработке поверхности. В качестве нижнего омического контакта к Si в структуре Me-porSi-Si-Me (Me-металл) использовался вожженный Al. В качестве верхнего контакта к пористому кремнию использовались Pt, Au и Al. Верхний контакт был изготовлен следующим образом. Естественная диэлектрическая пленка, которая образуется над слоем пористого кремния в процессе анодирования, использовалась в качестве межслойного диэлектрика. В тех местах, где требовался контакт металла с пористым кремнием, пленка удалялась импульсами N₂-лазера с контролем числа импульсов, попавших в каждую точку. На каждом образце было сформировано два типа структур. Структуры типа "точки" состоят из равноотстоящих отверстий (шаг 100 мкм) в пленке с диаметром около 20 мкм. На структурах типа "ребенки" в диэлектрической пленке удалялись линии шириной 20 мкм и с шагом 100 мкм. После этого на поверхность напылялся металл с толщиной около 0.2 мкм. На структурах типа "точки" металл удалялся лазерным рисованием везде, кроме узких линий, соединяющих точки. На структурах "ребенки" аналогичным образом формировалась встречно-штыревая структура из узких металлических полос. В последнем случае можно менять геометрию протекания тока: перпендикулярно и по поверхности образца соответственно. Различные образцы маркировались символом A_N, где буквы латинского алфавита A, B, C, . . . соответствуют определенной морфологии пористой структуры, а индекс N отвечает условиям лазерной обработки при формировании светоизлучающей структуры. Было исследовано в общей сложности около двадцати различных структур.

На рис. 1 приведены спектры электролюминесценции структур на образцах B₂ и B₃, в которых верхний контакт изготовлен из Pt. Структуры типа точки начинают светиться при потенциале $V \approx 20$ В и токе $I \approx 20$ мА и дают голубовато-белое свечение, хорошо заметное в темноте. Свечение наблюдается только при обратном смещении, т. е. когда к верхнему электроду приложен отрицательный потенциал. Структура "ребенки" на B₂ загорается при $V \approx 60$ В и $I \approx 30$ мА. При этом хорошо заметны яркие вспышки красного свечения, которые начинают доминировать по мере увеличения потенциала. Отметим, что красное

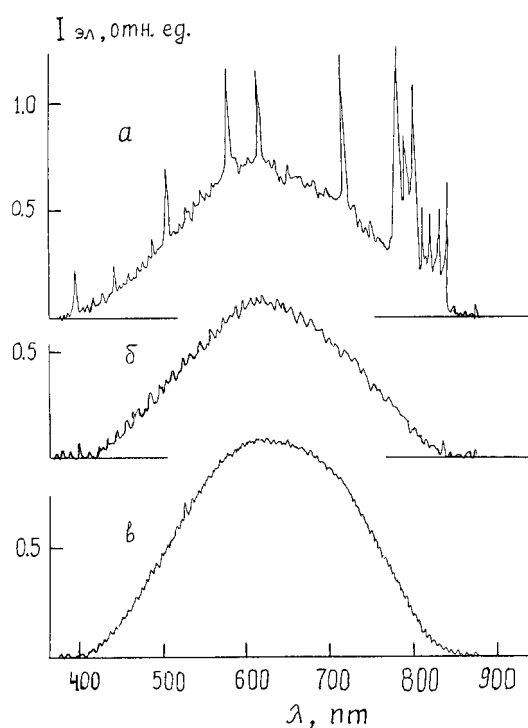


Рис. 1. Спектры электролюминесценции, снятые со следующих структур: *a* — образец B_2 , структура типа "гребенка"; *б* — образец B_2 , структура типа "точки"; *в* — образец B_3 , структура типа "точки".

свечение гораздо более яркое и хорошо заметно при дневном освещении. Голубовато-белое свечение связано, по-видимому, с поверхностными уровнями на внешней границе пористого кремния. Красное же свечение, по всей вероятности, обусловлено квантово-размерными эффектами в пористом кремнии. Таким образом обнаружено два типа свечения: стабильное, но слабое голубовато-белое свечение и нестабильное, но эффективное красное свечение.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики структур "точки" на образцах B_2 и B_3 и "гребенка" для B_2 . Как видно

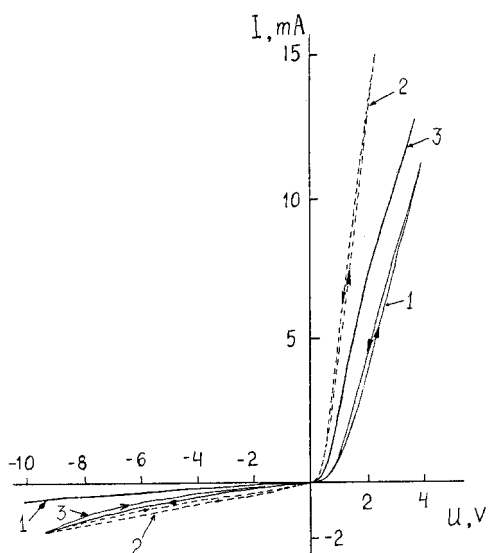


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики, снятые со следующих структур: 1 — образец B_2 , структура типа "гребенка"; 2 — образец B_2 , структура типа "точки"; 3 — образец B_3 , структура типа "точки".

из графика, характеристика имеет выпрямляющий характер. Хорошо заметен гистерезис, который изменяет свой вид в зависимости от того, производилась ли электролюминесценция на данном образце. Так, если до электролюминесценции более широкий гистерезис был на обратной ветви, то после электролюминесценции он уширяется на прямой ветви, и наоборот. При обходе вольт-амперной характеристики вдоль направлений, обозначенных стрелками, вначале по нижней прямой ветви характеристики идет заброс носителей в проводящее состояние с поверхностных состояний либо глубоких уровней, так что при возвратном проходе прямой ветви вольт-амперной характеристики эти избыточные носители дают дополнительный вклад в общий ток и прямая ветвь характеристики при возвратном ходе идет выше, чем при прямом. При переходе на обратную ветвь вольт-амперной характеристики картина меняется на противоположную (с точностью до знака).

Сложная форма характеристики свидетельствует об эффективной работе нескольких переходов в системе Pt-porSi-Si-Al. Исследование зависимости фото-эдс в вентильном режиме, которая меняет знак на противоположный при определенной длине волны освещения [13], подтверждает этот факт. Подробнее эти данные будут опубликованы позднее.

Для образцов, отличающихся, прежде всего, способом приготовления пористого слоя, а также дальнейшей лазерной обработкой при формировании электрولюминесценции структур, получаемые вольт-амперные характеристики отличаются друг от друга по форме. Имеются также отличия в форме гистерезиса. Это связано с тем, что формируемая структура представляет собой достаточно сложную систему переходов между материалами с различными физическими свойствами, характеризующимися разной зонной структурой. Наблюдаемые на эксперименте закономерности дают возможность заключить, что система Pt-porSi-Si-Al может быть схематично представлена как система последовательно включенных устройств, обладающих выпрямляющими свойствами. Характер поведения перехода Pt-porSi близок, по-видимому, к диодным свойствам перехода металл-полупроводник и оказывает незначительное влияние на форму вольт-амперной характеристики. Свойства перехода porSi-Si близки к свойствам изотипного гетероперехода $n-n$ типа с разной шириной зоны слева и справа от перехода. Поведение этого перехода может быть усложнено наличием поверхностных состояний на переходе. Работу изотипного гетероперехода можно промоделировать, согласно [13], двумя включенными навстречу друг другу диодами. Уровень Ферми в области пористого кремния и примесные уровни в пористом кремнии расположены ниже по отношению к зоне проводимости, чем в обычном кремнии, вследствие квантово-размерного эффекта [14]. Как показано в [13], работа изотипного $n-n$ гетероперехода (с точки зрения вольт-амперной характеристики) зависит, в частности, и от положения уровня Ферми в более широкозонном полупроводнике, в данном случае в пористом кремнии. Положение уровня в пористом кремнии определяется технологией приготовления пористого кремния, так как связано с квантово-размерным эффектом (через поперечные размеры пор).

В заключение отметим, что сформированный набор структур демонстрирует достаточно высокую эффективность электрولюминесценции и образцы не подвержены значительной деградации в течение длительного

времени (несколько месяцев). Проведенные эксперименты показывают, что реально достичь рабочих напряжений, соответствующих стандартам керамика–металл–оксид–полупроводник-технологии.

Авторы благодарят В.Ф. Бочкарева и В.В. Наумова за помощь в изготовлении структур.

Список литературы

- [1] *Smith R.L., Collins S.D.* // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. N 8. P. R1–R22.
- [2] *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046–1048.
- [3] *Koshida N., Koyama H.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 3. P. 347–349.
- [4] *Richter A., Steiner P., Kozlowski F., Land W.* // IEEE Electron Dev. Lett. 1991. V. 12. N 12. P. 691–692.
- [5] *Namavar F., Maruska H.P., Kalkhoran N.M.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 20. P. 2514–2516.
- [6] *Loni A., Cox T.I., Canham L.T., Calcott P.D., Simons A.J.* // Elec. Lett. 1995. V. 31. P. 1288–1295.
- [7] *Ben-Chorin M., Moller F., Koch F.* // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. N 4. P. 2981–2984.
- [8] *Ben-Chorin M., Moller F., Koch F.* // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. N 9. P. 4482–4488.
- [9] *Ben-Chorin M., Moller F., Koch F., Schirmacher W., Eberhard M.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. N 4. P. 2199–2213.
- [10] *Бучин Э.Ю., Постников А.В., Проказников А.В., Световой В.Б., Чурилов А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 1. С. 60–65.
- [11] *Buchin E.Yu., Churilov A.B., Postnikov A.V., Prokaznikov A.V., Svetovoy V.B.* // Phys. Low-Dim. Struct. 1995. V. 2/3. P. 97–104.
- [12] *Buchin E.Yu., Churilov A.B., Prokaznikov A.V.* // Appl. Surf. Science. 1996. V. 102. P. 431–435.
- [13] *Милнс А., Фойхт Д.* Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник. М.: Мир, 1975. 432 с.
- [14] *Cadet C., Deresmes D., Vuillaume D., Stievenard D.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 21. P. 2827–2829.