

Электролюминесценция наноструктурированного кремния в матрице анодного оксида алюминия

© С.К. Лазарук[¶], Д.А. Сасинович, П.С. Кацуба, В.А. Лабунов, А.А. Лешок, В.Е. Борисенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013 Минск, Беларусь

(Получена 28 ноября 2006 г. Принята к печати 15 декабря 2006 г.)

Предложена и реализована электролюминесцентная структура на основе наноструктурированного пористого кремния, встроенного в слой анодного оксида алюминия. Теплопроводность алюмооксидной матрицы значительно выше, чем кремнийсодержащих диэлектриков. Эффективный теплоотвод позволил достичь квантовой эффективности электролюминесценции 0.5%, что сравнимо с лучшими достижениями светоизлучающих устройств на основе кремния. Рассмотрены физические явления, ответственные за излучение света исследуемой структурой.

PACS: 61.46.-w, 68.37.Lp, 78.55.Mb, 78.60.Fi

1. Введение

Электролюминесценция в пленках наноструктурированного кремния интенсивно исследуется в последние годы с целью получения эффективного источника света для кремниевых интегральных микросхем. Разработка такого светоизлучающего элемента необходима для реализации скоростных оптических межсоединений, способных заменить традиционные металлические межсоединения, имеющие ограниченное быстродействие по причине резистивно-емкостных задержек. Известные электролюминесцентные устройства на основе наноструктурированного кремния используют в качестве материала несущей матрицы оксид кремния [1] либо нитрид кремния [2]. Однако эти материалы имеют низкую теплопроводность, что не позволяет разработанным устройствам функционировать при высоких плотностях электрического тока. В связи с этим нами разработаны, изготовлены и исследованы электролюминесцентные структуры на основе наноструктурированного пористого кремния, встроенного в матрицу анодного оксида алюминия, теплопроводность которого значительно превосходит аналогичный параметр кремнийсодержащих диэлектриков. Приведены параметры и характеристики изготовленных структур, обсуждены особенности электролюминесценции в них.

2. Эксперимент

Экспериментальные структуры создавали по технологии, описанной в [3,4], нанесением композиционной пленки алюминий + кремний (Al + Si) толщиной 0.4 мкм на пластины монокристаллического кремния (с удельным сопротивлением 0.1 Ом · см) методом магнетронного распыления мишени, содержащей 45 ат% кремния и 55 ат% алюминия. Нанесенные пленки подвергали анодной обработке в 2%-м водном растворе серной кислоты через предварительно сформированные на их поверхностях фоторезистивные маски. Различные скорости анодирования алюминия и кремния обеспечивали

формирование нанокompозитной пленки наноструктурированного пористого кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу [5]. Непроанодированные области, защищенные фоторезистивной маской, образовывали металлические электроды между проанодированными областями, как это схематично показано на рис. 1. Площадь металлических электродов составляла 0.005 см².

Распределение атомов кремния и алюминия по толщине исследуемых структур определяли послойным оже-анализом на установке PHI-660 Perkin Elmer. Структуру пленок исследовали растровой и просвечивающей электронной микроскопией.

Вольт-амперные характеристики изготовленных структур измеряли в диапазоне от комнатной температуры до 150°C. Фото- и электролюминесцентные измерения проводили при комнатной температуре с использованием GaAs-фотоумножителя.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты оже-анализа исходных композиционных пленок Al + Si (рис. 2) показали, что содержание кремния в них соответствует 45 ат%, т.е. такое же, как и в исходной мишени. Послойное травление исследуемой

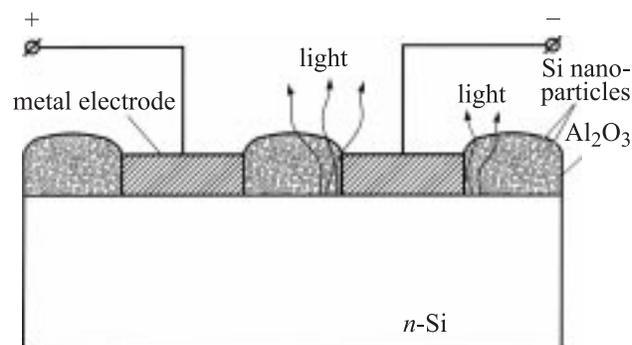


Рис. 1. Электролюминесцентная структура из наноструктурированного пористого кремния, включенного в матрицу анодного оксида алюминия.

[¶] E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by

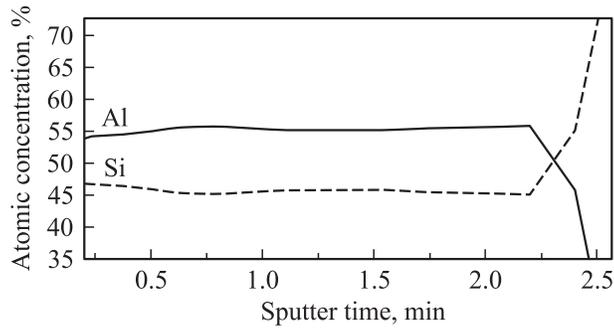


Рис. 2. Профиль распределения элементов по толщине исследуемой композиционной пленки Al + Si.

пленки во время анализа показало однородное распределение кремния по толщине.

При анодировании композиционной пленки Al + Si два составляющих материала подвергаются анодному окислению в разной степени. Так, скорость анодного окисления для алюминия составляет 1 нм/В, а для кремния 0.25 нм/В [6]. Следовательно, в результате анодного окисления основная часть алюминия полностью переходит в оксид, в то время как кремниевые наночастицы могут лишь частично окислиться, оставаясь встроенными в диэлектрическую матрицу.

На рис. 3 показана структура пористого кремния после селективного удаления анодного оксида алюминия. Очевидно, что атомы кремния образуют связанную сеть внутри диэлектрической матрицы. Характерные размеры кремниевого „скелета“ — 10–30 нм. Анализ кремниевого „скелета“ просвечивающей электронной микроскопией (рис. 4) показал, что его большая часть состоит из аморфной фазы, однако имеются и включения нанокристаллического кремния размерами несколько нанометров.

Из исследуемого нанокompозитного материала были изготовлены устройства с выпрямляющими барьерами Шоттки между металлическими электродами, образованными непроанодированной областью, и кремниевой подложкой. При подаче на один из электродов отрицательного потенциала более 6 В по его периметру наблюдали излучение видимого диапазона. Отметим, что вокруг электродов с положительным потенциалом также наблюдали электролюминесценцию видимого диапазона, но ее интенсивность была в значительной степени меньше. Более того, интенсивность света вдоль стороны электрода с отрицательным потенциалом, расположенной ближе к положительному электроду, выше, что схематично показано на рис. 1. Поэтому в данной работе мы исследовали спектр электролюминесценции при отрицательном смещении электрода и соответствующую ветвь вольт-амперных характеристик.

Следует отметить, что электролюминесценция видимого диапазона наблюдается и при подаче отрицательного смещения на электрод, а положительного смещения на подложку. Однако интенсивность в этом случае

меньше, чем при электрической схеме подключения, представленной на рис. 1.

Известно, что планарные электроды диодов Шоттки подвержены влиянию краевых эффектов по периметру контактов. За счет этого напряженность электрического поля на краях электродов в несколько раз превышает аналогичную величину в центральной части контакта Шоттки. Именно высокая напряженность электрического поля по периметру электродов обеспечивает частичное протекание электрического тока через наноструктурированный кремний, встроенный в алюмооксидную

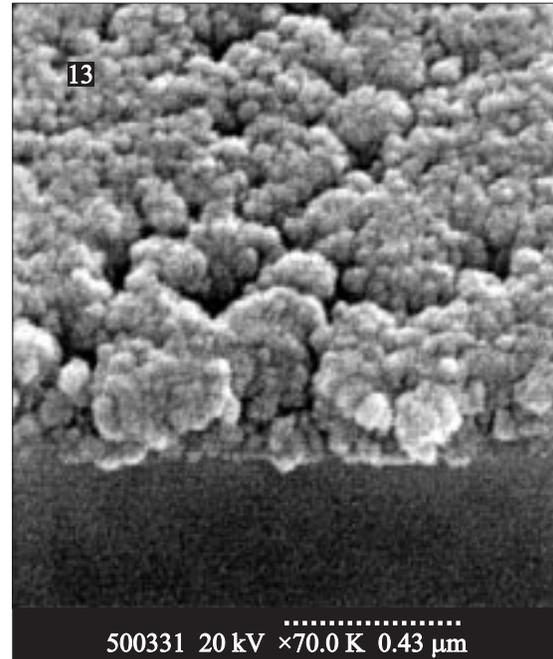


Рис. 3. Структура пористого кремния после селективного вытравливания оксида алюминия.

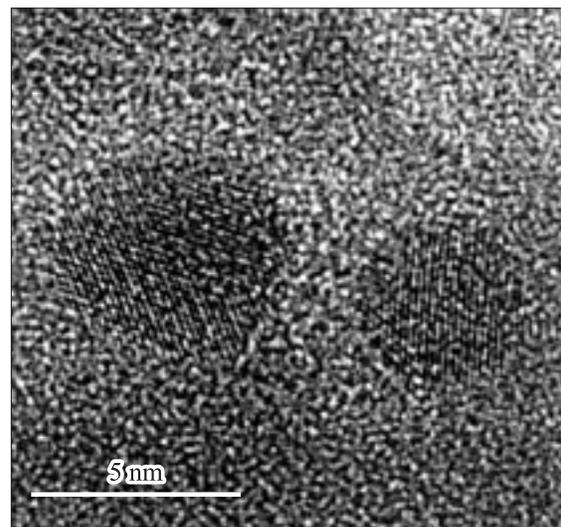


Рис. 4. Просвечивающая электронная микроскопия наноструктурированного кремния в матрице анодного оксида алюминия.

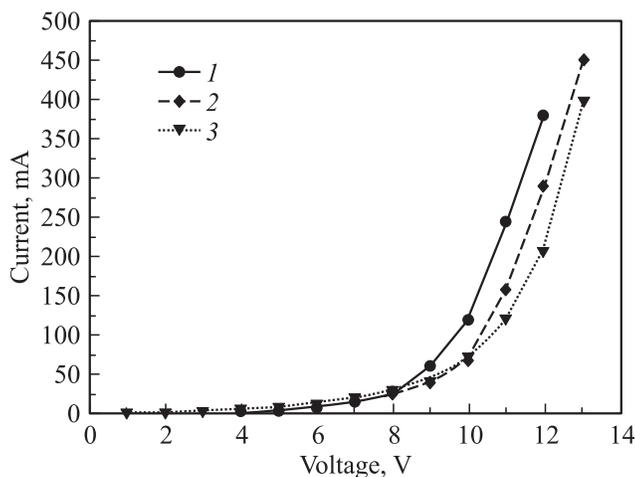


Рис. 5. Обратные ветви вольт-амперных характеристик исследуемых структур при температурах $T = 25$ (1), 100 (2) и 150°C (3).

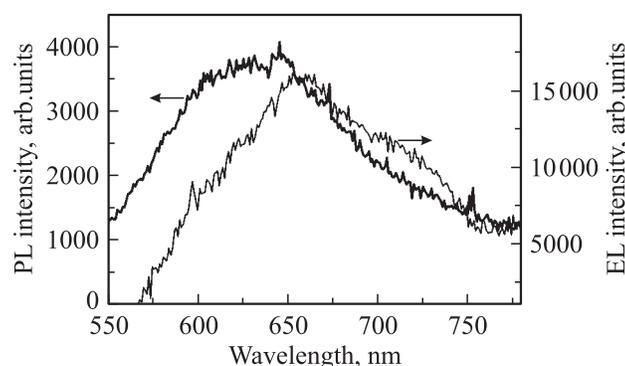


Рис. 6. Спектры фотолюминесценции (PL) и электролюминесценции (EL) наноструктурированного пористого кремния, включенного в матрицу анодного оксида алюминия. Электролюминесценция регистрировалась при пропускании через структуру тока 100 мА .

матрицу, несмотря на то что его сопротивление более чем на порядок выше сопротивления кремниевой подложки.

Представленные на рис. 5 обратные ветви вольт-амперных характеристик исследуемых структур показывают, что пробойное напряжение увеличивается с ростом температуры, что типично для лавинного механизма пробоя. Следовательно, можно сделать вывод, что в нашем случае происходит предпробойная электролюминесценция [7]. В этом случае на краях металлических электродов имеет место эффект концентрации силовых линий электрического поля объемного пространственного заряда. Именно по периметру металлических электродов наноструктурированный пористый кремний, встроенный в алюмооксидную матрицу, обеспечивает формирование токопроводящих каналов. В этом пограничном наноструктурированном пористом кремнии под действием высоких электрических полей происходит ударная ионизация электронно-дырочных пар, которые там же

рекомбинируют с испусканием фотонов видимого диапазона. Подтверждением этого вывода служит схожесть спектров фото- и электролюминесценции исследуемых структур, приведенных на рис. 6. Максимум интенсивности люминесценции находится в районе 650 нм для обоих спектров. Незначительные различия формы спектров могут быть объяснены различными механизмами возбуждения фото- и электролюминесценции. Также следует отметить, что на аналогичных структурах без пористого кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу, ни фото-, ни электролюминесценции не наблюдалось, что еще раз подтверждает отмеченную природу светоизлучения в исследуемых структурах. Таким образом, наличие наноструктурированного кремния в местах генерации электронно-дырочных пар обеспечивает эффективную электролюминесценцию света в видимом диапазоне спектра.

Зависимость интенсивности электролюминесценции от плотности тока, протекающего через исследуемую структуру, — сверхлинейная с показателем степени 2. Аналогичная зависимость наблюдалась для обратно смещенных светодиодов на пористом кремнии, полученных электрохимическим анодированием в растворах плавиковой кислоты [8]. Это означает, что при увеличении плотности тока через электролюминесцентные структуры будет увеличиваться эффективность светоизлучения. При этом определяющим параметром является максимально допустимая плотность электрического тока. В нашем случае удалось достичь величины 200 А/см^2 , что значительно выше, чем в случае светодиодных конструкций на основе обычного пористого кремния или кремниевых наночастиц, встроенных в матрицу оксида кремния. Данное преимущество объясняется высокой теплопроводностью используемых материалов в конструкции разработанного электролюминесцентного устройства. В частности, теплопроводность оксида алюминия составляет 17 Вт/мК , что более чем на порядок выше по сравнению с оксидом кремния. Использование материалов с высокой теплопроводностью позволяет эффективно рассеивать выделяемое тепло, предотвращая наступление необратимого теплового пробоя. Квантовая эффективность, оцененная при максимально допустимых плотностях электрического тока, составляет 0.5% , что соизмеримо с лучшими достижениями для светоизлучающих устройств на основе наноструктурированного кремния [4,9]. Еще одним важным преимуществом разработанной электролюминесцентной конструкции является ее совместимость с компонентами кремниевых интегральных микросхем, что позволяет интегрировать ее в различных микросистемных устройствах, изготавливаемых по кремниевой технологии.

4. Заключение

Электролюминесцентные структуры на основе наноструктурированного пористого кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу, имеют как технологические,

так и параметрические преимущества перед другими известными электрولюминесцентными устройствами на основе кремния, что делает их привлекательными для использования в качестве источников света в интегральных микросхемах.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (договор № В-276.2).

Список литературы

- [1] L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, F. Priolo. *Nature*, **408**, 440 (2000).
- [2] Z. Pei, Y.R. Chang, H.L. Hwang. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2839 (2002).
- [3] S. Lazarouk, P. Jaguiro, S. Katsouba, G. Masini, S. La Monica, G. Maiello, A. Ferrari. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2108 (1996).
- [4] С.К. Лазарук, А.А. Лешок, В.А. Лабунов, В.Е. Борисенко. *ФТП*, **39**, 149 (2005).
- [5] С.К. Лазарук, П.В. Жагиро, А.А. Лешок, В.Е. Борисенко. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **66**, 178 (2002).
- [6] Л. Юнг. *Анодные оксидные пленки* (Л., Энергия, 1961) гл. 17, 19.
- [7] И.К. Верещагин, Б.А. Ковалев, Л.А. Косяченко, С.М. Кокин. *Электрولюминесцентные источники света* (М., Энергоатомиздат, 1990) гл. 1, 4.
- [8] Ю.А. Берашевич, С.К. Лазарук, В.Е. Борисенко. *ФТП*, **40**, 240 (2006).
- [9] B. Gelloz, N. Koshida. *J. Appl. Phys.*, **88**, 4319 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

Electroluminescence of nanostructured silicon in anodic alumina matrix

*S.K. Lazarouk, D.A. Sasinovich, P.S. Katsuba,
V.A. Labunov, A.A. Leshok, V.E. Borisenko*

Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
220013 Minsk, Belarus

Abstract The electroluminescent device based on the nanostructured porous silicon built-in an anodic alumina has been made. The alumina heat conductivity is higher compared to silicon containing dielectrics. The improvement of the heat-removing path has allowed to reach quantum efficiency of the electroluminescence up to 0.5% that is comparable to the best achievements of light-emitting devices based on silicon nanostructures. Physical phenomena responsible for light emission are considered.