# РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

MOCKBA

УДК 535.37

# ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДАХ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

# © 2002 г. С. К. Лазарук, П. В. Жагиро, А. А. Лешок, В. Е. Борисенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

Проведено исследование фото- и электролюминесценции в лавинных светодиодах на основе пористого кремния. Обсуждены механизмы генерации и излучательной рекомбинации в исследуемых структурах. Показано, что эффект локального увеличения напряженности электрического поля в нанокристаллитах пористого кремния приводит к ударной ионизации и лавинному умножению носителей заряда, в результате чего происходят генерация электронно-дырочных пар и их последующая рекомбинация с испусканием фотонов.

#### ВВЕДЕНИЕ

Кремний, будучи основным материалом микроэлектроники, не нашел широкого применения в оптоэлектронных интегральных схемах из-за непрямозонного характера его запрещенной зоны. Однако после обнаружения эффективной фотолюминесценции в пористом кремнии (ПК) появилась надежда на развитие и кремниевой оптоэлектроники [1, 2]. Особенно это актуально для создания оптических межсоединений в кремниевых чипах, так как традиционные металлические межсоединения по причине RC-задержек не способны работать в гигагерцевом диапазоне частот. Основная проблема реализации кремниевых оптических межсоединений связана с изгоэффективного светоизлучающего товлением элемента, способного работать в гигагерцевом диапазоне. Достижения последних лет показали перспективность использования светодиодов на ПК для этих целей. Так, недавно получены светодиоды с внешней квантовой эффективностью более 1% [3]. Кроме того, время нарастания светового импульса достигло величины нескольких наносекунд [4, 5], вплотную приблизившись к гигагерцевому диапазону рабочих частот [6]. К сожалению, большая часть работ по светодиодам на пористом кремнии посвящена приборам, работающим при прямом смещении, в то время как лучшие значения эффективности, стабильности и быстродействия светоизлучения получены при обратном смещении в режиме лавинного пробоя контакта металл – ПК [3-6]. В связи с этим в данной работе будут обсуждены физические явления в лавинных светодиодах на основе ПК с целью поиска путей улучшения их параметров.

# ЭКСПЕРИМЕНТ

Процесс изготовления исследуемых структур подробно описан в [4], поэтому мы приведем лишь основные технологические этапы. Светоиз-

лучающие диоды формировали на кремниевых подложках п-типа проводимости с удельным сопротивлением 0.01 Ом · см-1. ПК получали анодированием в 1%-ном водном растворе плавиковой кислоты при плотности тока формовки 4 мА · см<sup>-2</sup>. В процессе анодирования рабочую поверхность кремниевой подложки освещали вольфрамовой лампой мошностью 100 Вт на расстоянии 10 см. Толщина пленки ПК 1.0 мкм. На поверхность пористого слоя осаждали пленку алюминия, после чего при помощи операций фотолитографии и сквозного электрохимического анодирования алюминия формировали металлические электроды площадью 0.3 мм<sup>2</sup>. Структура сформированного таким образом прибора показана на рис. 1. Для записи спектров фото- и электролюминесценции использованы кремниевый и германиевый фотоприемники для видимого и инфракрасного диапазонов соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение вольт-амперных характеристик сформированных структур показало устойчивые выпрямляющие свойства контактов. При смещении в 1 В коэффициент выпрямления достигает величины 2000, что позволяет говорить о наличии барьера Шотки между ПК и алюминиевыми электродами. Специально следует отметить, что интенсивность электролюминесценции при обратном смещении значительно превосходит аналогичную величину при прямом смещении. Причем эту особенность наблюдали, как для первых светодиодов на основе Шотки контакта металл -ПК [7], так и в недавнем эксперименте [3], где достигнута внешняя квантовая эффективность более 1%. Такой эффект необычен для традиционных светодиодов на основе однородных полупроводниковых материалов, у которых инжекция неосновных носителей при прямом смещении



**Рис. 1.** Светоизлучающий диод на основе пористого кремния (a) и схематичное распределение силовых линий электрического поля в пористом кремнии *n*-типа ( $\delta$ ).

обеспечивает более высокую эффективность светоизлучения по сравнению с механизмами инжекции при обратном смещении [8]. По нашему мнению, такое несоответствие может быть объяснено уникальной регулярной структурой пористого кремния *n*-типа.

Как показано на рис. 16, условно структуру ПК *п*-типа можно представить как регулярную цепь нанокристаллитов с размерами, достаточно малыми для проявления эффекта квантового ограничения (<5 нм), и с размерами, где данный эффект не наблюдается (>5 нм) [9]. При распространении электрического поля через такую структуру в нанокристаллитах минимального размера будет наблюдаться эффект "сгущения" силовых линий, т.е. эффект локального увеличения напряженности электрического поля в этих местах. Как известно, высокая напряженность электрического поля - причина возникновения "горячих" носителей заряда, вызывающих эффекты ударной ионизации и лавинного умножения, в результате чего происходят генерация электронно-дырочных пар и их последующая рекомбинация с испусканием фотонов. Таким образом, регулярная структура ПК п-типа обеспечивает условия, благоприятные для развития эффектов ударной ионизации, чего нет в полупроводниковых материалах с однородной структурой.

На рис. 2 представлены спектры фото- и электролюминесценции исследуемых структур. Спектры электролюминесценции измеряли для различных обратных токов через светодиоды. Фотолюминесценция находится в видимом диапазоне и имеет максимум на длине волны 575 нм в то время, как спектры электролюминесценции имеют два пика на 650 и 1150 нм, перекрывая как видимый, так и инфракрасный диапазоны. Различие спектров фото- и электролюминесценции в видимой области может быть объяснено особенностями электролюминесценции при лавинном пробое полупроводников. В частности, сдвиг пика электролюминесценции в низкоэнергетическую область типичен для всех полупроводниковых материалов [10]. Также типичны для лавинных светодиодов широкие спектры электролюминесценции, так как наряду с рекомбинационными переходами зона – зона имеют место внутризонные переходы носителей заряда с высокоэнергетических на низкоэнергетические уровни.

Отсутствие фотолюминесценции в инфракрасном диапазоне объясняется непрямозонной природой светоизлучающих переходов в кремниевых нанокристаллитах больших размеров. В случае электролюминесценции наряду с генерацией электронно-дырочных пар при лавинном пробое имеет место разогрев материала, что вызывает генерацию фононов. Таким образом, появляются условия для светоизлучающих переходов с участием третьей частицы – фонона. Сдвиг пика электролюминесценции на 1150 нм по сравнению с шириной запрещенной зоны кремния 1100 нм, как уже отмечалось, типичен для всех полупроводниковых материалов при лавинном пробое. Измерения спектров электролюминесценции при различных обратных токах показали, что интенсивность светоизлучения в видимом диапазоне пропорциональна квадрату тока, в то время как интенсивность электролюминесценции в инфракрасном диапазоне пропорциональна току. Эта особенность еще раз подтверждает предположение о различных механизмах светоизлучения в видимом и инфракрасном диапазонах.

На рис. 3 показана энергетическая зонная диаграмма исследуемой структуры, где представле-

### ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДАХ



Рис. 2. Спектры фотолюминесценции (а) и электролюминесценции видимого (б) и инфракрасного (в) диапазонов.

ны различные механизмы светоизлучения, которые могут быть описаны следующей феноменологической моделью. При подаче напряжения обратного смещения (до 3–4 В) на контакт металл – ПК через контакт протекает незначительный обратный ток экстракции неосновных носителей заряда. По мере роста смещающего напряжения и соответственно электрического поля в исследуемой структуре появляются условия для образования "горячих" носителей заряда, которые при соударении с кристаллической решеткой генерируют электронно-дырочные пары (рис. 3). Учитывая факт, что электрическое поле неодно-



**Рис. 3.** Диаграмма энергетических зон контакта металл—пористый кремний *n*-типа при обратном смещении:  $hv_1$  – межзонное излучение видимого диапазона;  $hv_2$  – межзонное излучение ИК-диапазона;  $hv_3$  – внутризонное излучение.

родно по объему пористого кремния (см. рис. 1), можно предположить, что лавинный пробой начинается в местах высокой напряженности электрического поля, т.е. в нанокристаллитах минимальных размеров. При дальнейшем увеличении смещающего напряжения эффекты ударной ионизации горячих носителей заряда происходят по всему объему ПК, вызывая генерацию электронно-дырочных пар как в области присутствия электрического поля, так и в нейтральной части пористого кремния [8]. При этом необходимо отметить следующие механизмы светоизлучения (рис. 3): межзонная рекомбинация электронно-дырочной пары в нанокристаллитах, где проявляется эффект квантового ограничения (hv1-излучение); межзонная рекомбинация электронно-дырочных пар в более крупных нанокристаллитах при отсутствии эффекта квантового ограничения (hv2-излучение); внутризонное излучение за счет перехода носителей заряда с высоко- на низкоэнергетические уровни (hv3-излучение).

Очевидно, что из всех приведенных механизмов наибольший интерес представляет межзонная рекомбинация электронно-дырочных пар в нанокристаллитах, где проявляется эффект квантового ограничения. Как следует из проведенных исследований, эффективность светоизлучения увеличивается с ростом обратного тока. Однако рост обратного тока ограничивается наступлением необратимого теплового пробоя. Эта проблема может быть решена за счет эффективного отвода джоулевого тепла.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать рекомендации по улучшению эффективности лавинных светодиодов на основе

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 66 № 2 2002

ПК. Во-первых, необходим поиск режимов формирования пористого кремния, обеспечивающих более однородное распределение кремниевых нанокристаллитов с достаточно малыми размерами (<5 нм) для проявления эффекта квантового ограничения. Во-вторых, требуется применение материалов с высокой теплопроводностью, таких как алмазоподобные подложки, для решения проблемы теплоотвода. В-третьих, целесообразно использовать импульсный режим обратного смещения, обеспечивающий высокую амплитуду сигнала и рассеивание выделяемого тепла в интервале между импульсами.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Canham L. T.// Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 1046.
- Lazarouk S., Jaguiro P., Borisenko V. // Phys. Status Solidi (a). 1998. V. 165. P. 87.

(a) Second Barrowski, A. S. and D. Second Martine (2019). And the second sec

(a) A set of patches (b) and patches (b) an

- Gelloz B., Koshida N. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. P. 4319.
- Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S. et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 2108.
- Лазарук С.К., Жагиро П.В., Мельников С.М., Прохоренко А.П. // Изв. Белорусской инж. академии. 2000. Т. 9 № 1–2. С. 69.
- Balucani M., La Monica S., Lazarouk S. et al. // Solid State Phenomena. 1997. V. 54. P. 8.
- Richter A., Steiner P., Kozlowski F., Lang W. // IEEE Electron Dev. Lett. 1991. V. 12. P. 691.
- Верещагин И.К., Ковалев Б.А., Косяченко Л.А., Кокин С.М. // Электролюминесцентные источники света / Под ред. Верещагина И.К. М.: Энергоатомиздат, 1990. Гл. 4.
- Calcot P. // Properties of Porous Silicon / Ed. Canham L. London: INSPEC, 1997. Ch. 7.
- 10. Haecker W. // Phys. Status Solidi (a). 1974. V. 25. P. 301.



The state of the second s

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 66 № 2 2002