

УДК 681.382.473

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

А.Ю. КЛЮЦКИЙ, С.К. ЛАЗАРУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 8 марта 2021*

Аннотация. Рассмотрена перспектива использования светоизлучающих структур на основе кремния в системах кодирования. Исследованы характеристики лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния. Показана возможность создания оптических систем межсоединений на основе кремния.

Ключевые слова: кремниевые оптические межсоединения, светодиоды на основе наноструктурированного кремния.

Введение

Системы кодирования и цифровой обработки сигнала находят широкое применение во всех областях науки и техники. Принципы кодирования и шифрования информации базируются на использовании в своем алгоритме последовательностей случайных чисел, которые формируются с помощью таких устройств, как генераторы. Существующие программные решения являются генераторами псевдослучайных чисел, что делает их непригодными для задач криптографии. Аппаратные генераторы, в свою очередь, обладают низкой скоростью работы по сравнению с программными, а также подвержены деградации. Поэтому важной задачей является разработка устройств, решающих данные проблемы. Одним из современных направлений аппаратных генераторов случайных чисел является использование однофотонных источников излучения. Конструктивно такие генераторы состоят из квантово-оптической системы, включающей в себя однофотонный источник излучения, лавинный фотодетектор, оптический канал связи, оптическую линию задержки, и устройства преобразования и обработки информации [1]. Однофотонные излучатели, как правило, представляют собой квантовые точки арсенида индия. Однако существует перспектива создания таких излучателей на основе наноструктурированного кремния. Использование наноструктурированного кремния в качестве основного материала светоизлучающего элемента позволяет добиться интеграции всех составляющих системы оптических межсоединений на одном кристалле. Интеграция внутри кремниевого чипа значительно увеличит эффективность таких приборов. Кроме того, светоизлучающие элементы на основе наноструктурированного кремния будут отличаться низкой стоимостью, в связи с тем, что при их изготовлении будут применяться традиционные методы кремниевой технологии, которая в настоящее время достаточно хорошо освоена [2].

Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния

Разработка и создание эффективных светоизлучающих устройств может быть реализована на основе наноструктурированного кремния [3]. Их отличительной особенностью является излучение света при обратном смещении p - n переходов или контактов Шоттки в режиме лавинного пробоя. Использование лавинного механизма пробоя обеспечивает высокое быстродействие таких устройств.

В работе [4] представлена методика формирования матрицы лавинных фотодиодов на основе наноструктурированного кремния. Светоизлучающая часть матрицы представляет из себя ячейку встречновключенных лавинных светодиодов, состоящую из двух контактов Шоттки, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Наноструктурированный кремний встроен в матрицу оксида алюминия в качестве активного

материала. По данной методике была изготовлена матрица светодиодов (рис. 1), состоящая из 35 ячеек.

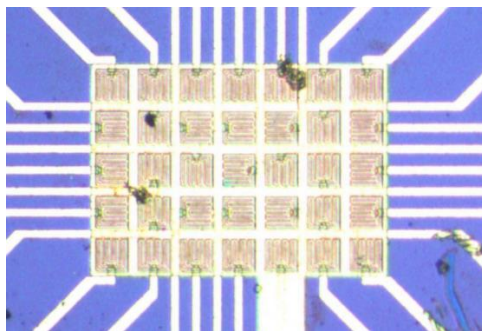


Рис. 1. Матрица лавинных светодиодов

Светодиодные ячейки объединены одним контактом с подложкой таким образом, что образуют структуру, представленную на рис. 2.

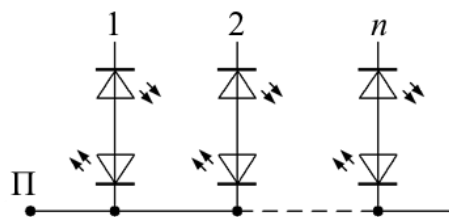


Рис. 2. Электрическая схема матрицы светодиодов: 1, 2, n – выводы подключения светодиодов; П – вывод подключения подложки

Для исследования сформированной матрицы светодиодов был изготовлен тестовый образец оптической системы. Тестовый образец представляет собой металлический корпус для защиты от помех и внешних источников света, в котором размещены светоизлучающая матрица и оптически связанный с ней фотодетектор.

В качестве фотодетектора для тестового образца выбран $p-i-n$ фотодиод типа BPW34. Он обладает высоким быстродействием (до 100 нс), высокой чувствительностью, а также широким спектром принимаемых длин волн (от 430 нм до 1100 нм).

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены микрофотографии светодиодной ячейки сформированной матрицы светодиодов. При увеличении питающего напряжения между ячейкой светодиодов и подложкой до напряжения лавинного пробоя обратносмещенного светодиода ячейки, наблюдается излучение света вдоль периметра структуры (рис. 3, б). Соответственно напряжение питания для данной матрицы можно подавать как прямой, так и обратной полярности.

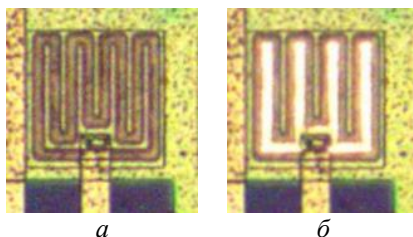


Рис. 3. Микрофотографии сформированной ячейки матрицы светодиодов: а – в отсутствии питающего напряжения; б – при подаче напряжения питания

Для исследования характеристик тестового образца использовался высокоточный двухканальный источник-измеритель Keithley2604B. Источник-измеритель позволяет формировать ступенчатый сигнал с заданной длительностью и амплитудой ступеньки, а наличие

второго канала дает возможность подключать и снимать характеристики светодиода и фотодетектора одновременно. Для поддержания постоянной температуры при измерении характеристик используется термокамера, которая позволяет поддерживать температуру внутри нее в диапазоне от -20 до $+70$ °C с точностью не хуже 1 % от установленного значения.

Вольт-амперные характеристики ячейки светодиодов измерялись при прямом и обратном подключении источника питания и представлены на рис. 4, а, б соответственно.

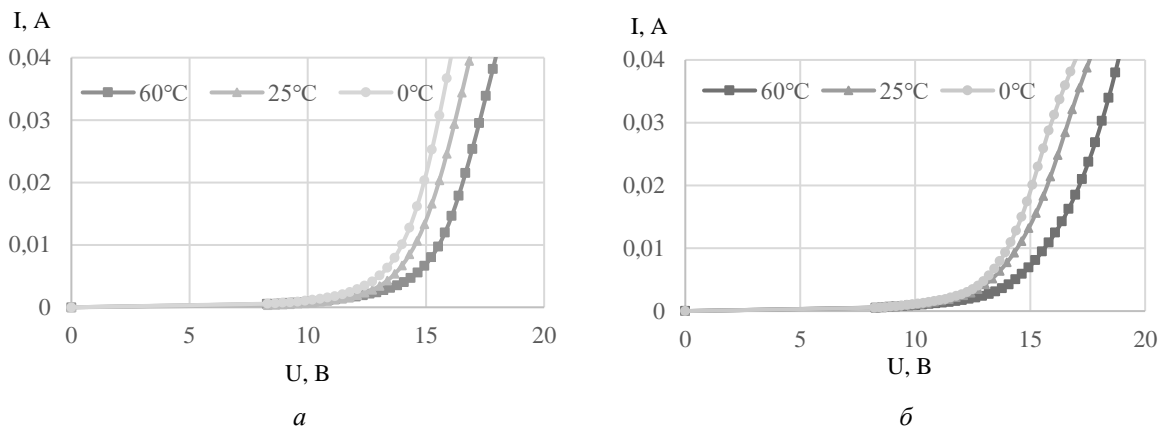


Рис. 4. ВАХ ячейки светодиодов: а – при прямом смещении; б – при обратном смещении

На графиках наблюдается смещение кривой характеристики вправо при увеличении температуры (как при прямом подключении, так и при обратном), что соответствует положительному температурному коэффициенту напряжения, характерному для лавинных пробоев полупроводника. Кривые на рис. 4, б имеют меньшую крутизну, по сравнению с прямым включением, однако характеристики практически идентичны, что можно объяснить одинаковыми параметрами двух светодиодов в данной ячейке.

Измерения сигнала ответа на фотодетекторе проводились в фотодиодном режиме работы (при подаче постоянного обратного смещения на фотодиод); в режиме короткого замыкания фотодиода на измеритель и в фотогальваническом режиме работы фотодиода при нагрузке на измеритель. Полученные данные ответа фотодиода имеют достаточно малые абсолютные значения и нагляднее всего отображаются при фотогальваническом режиме работы фотодиода, поэтому передаточные характеристики тестового образца представлены графиками зависимостей ЭДС фотодиода от тока светодиодной матрицы для прямого и обратного подключения (рис. 5).

На графиках можно наблюдать характерное для фотодиодов нелинейное увеличение фото-ЭДС. Также с увеличением температуры системы фото-ЭДС падает, что может быть связано с увеличением собственных шумов фотодиода. Наиболее эффективным режимом работы для тестового образца является импульсный, так как он позволяет уменьшить саморазогрев системы.

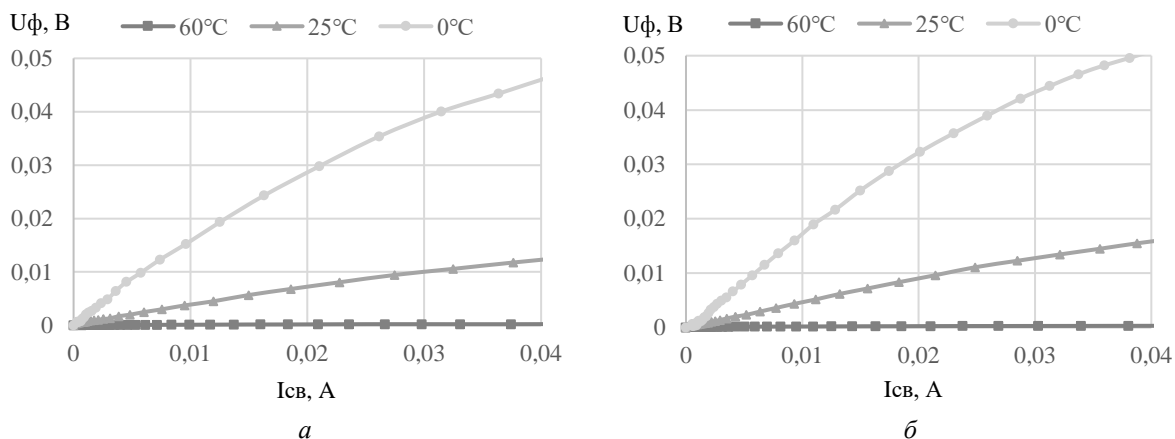


Рис. 5. Передаточные характеристики тестового образца: а – при прямом смещении; б – при обратном смещении

Заключение

Проведенные исследования показали возможность создания устройств, включающих в свой состав светоизлучающие структуры на основе кремния. Полученные результаты можно использовать при разработке устройств оптоэлектроники на основе наноструктурированного кремния, что позволяет добиться интеграции всех составляющих оптических систем на одном кристалле. В частности, формирование квантовых точек на основе кремния позволит в перспективе создать однофотонный генератор случайных чисел, который может быть интегрирован с другими устройствами, чем значительно увеличит эффективность и быстродействие таких устройств.

STUDY OF OPTICAL LIGHT EMITTERS BASED ON POROUS SILICON

A.Yu. KLIUTSKI, S.K. LAZAROUK

Abstract. The prospect of using silicon-based light-emitting structures in coding systems are considered. The characteristics of avalanche LEDs based on nanostructured silicon have been investigated. The possibility of creating optical interconnection systems based on silicon are shown.

Keywords: silicon optical interconnects, LEDs based on por-Si.

Список литературы

1. Балыгин К.А. // Письма в ЖЭТФ. 2017. № 106. С 451–458.
2. Трегулов В.В. Пористый кремний: технология, свойства, применение. Рязань.: Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина, 2011.
3. Лазарук С.К. [и др.] // Докл. БГУИР. 2004. № 3 (7). С. 27–37.
4. Ле Динь Ви [и др.] // Докл. БГУИР. 2019. № 7–8 (126). С. 165–172.