

УДК 621.315.592.2

П.В. Деминский

## Селективная фоточувствительность при реверсивном включении светодиодов в интегральных RGB источниках белого света

**Исследовано и проведено сравнительный анализ фоточувствительности в диапазоне длин волн белого света кремниевых фотоприемников и RGB светодиодов в реверсивном режиме включения.**

**The comparative analysis of the characteristics of diode detectors and light sources in a reverse mode is researched and conducted.**

**Ключевые слова:** *реверсивный, RGB, светодиод.*

### Введение

Во многих общественных, коммерческих, медицинских и аграрных применениях требуется гибридная или монолитная интеграция источников твердотельного освещения. Интегрированные твердотельные источники света представляют новый класс оптоэлектронных устройств, которые дополняют микропроцессоры и другие интегральные схемы (ИС). Однокристалльные твердотельные устройства освещения могут активно и выборочно маршрутизировать большое количество визуальных каналов, используя только один источник света, что обеспечивает существенные преимущества перед существующими устройствами. Эти преимущества состоят в упрощенной схемной реализации, слабых управляющих токах, высокой скорости переключения, малых размерах и низкой стоимости [1].

Только светодиодные и микролазерные излучатели света обладают такими уникальными свойствами как микропроцессорной управляемостью, мультиспектральностью, динамическими свойствами в широком диапазоне длин волн, временной и пространственной когерентностью, которыми не обладают традиционные источники света, такие как лампы накаливания, люминесцентные обычные и энергосберегающие, газоразрядные в том числе высокого давления. В настоящее время широкое распространение находят светодиоды, в которых белый свет излучается люминофором, который возбуждается фиолетовым светодиодом. Несмотря на сравнительную простоту технологии и дешевизну продукции по характеру взаимодействия с человеком они принципиально не отличаются от традиционных люминесцентных ламп по основ-

ным светотехническим параметрам и ограниченному сроку службы.

В отличие от люминофорных источников белого света, RGB источники обладают большими возможностями по функциональному управлению параметрами освещения и снижения стоимости при их монолитной интеграции [2]. Применение реверсивного режима включения светодиодов обеспечивает возможность контроля и управления параметрами белого света с помощью быстродействующего микропроцессора, при котором процесс регулирования незаметен для зрительного аппарата человека.

### Постановка задачи

Микропроцессорное управление характеристиками излучения диодных RGB источников белого света может осуществляться реализацией обратной связи между параметрами красного, зеленого и голубого светодиодов. Такая обратная связь в крупногабаритных RGB системах на дискретных светодиодах осуществляется через встроенные фотоприемники с оптическими фильтрами, которые выделяют необходимые полосы чувствительности. В интегральном источнике света применение габаритных стеклянных светофильтров неприемлемо. В одной из первых работ нашей лаборатории по интеграции источников белого света предложена и реализована обратная связь выходных оптических сигналов RGB излучающих светодиодов через светодиоды в фоточувствительном режиме включения, т.е. при нулевом или обратном напряжении включения p-n переходов [1]. Поскольку сверхяркие светодиоды реализуются на прямозонных материалах с резкой границей поглощения света в системах AlGaInP (красный, желтый) и AlGaInN (голубой, зеленый) их гетероструктуры имеют селективную чувствительность с резким ее падением при больших длинах волн, чем малоэнергетическое крыло спектра излучения, для которых материал гетероструктуры практически прозрачен и поглощение в нем квантов света не создает электронно-дырочных пар фототока. В настоящей работе исследована реверсивная фоточувствительность светодиодных гетероструктур AlGaInP/GaP и AlGaInN/SiC, которые интегрируются с кремниевыми транзисторными микропроцессорами.

## Методика и результаты исследований

В процессе исследований использовались: рельса (1), на которой были размещены крепежные элементы (2), при помощи которых поочередно на одном уровне на расстоянии 80 (мм) по отношению к закрепленной светодиодной матрице (3) (характеристики матрицы находятся в табл. 1) устанавливались красный светодиод (4) и Si фотодиод (4) (схема измерений изображена на рис. 1). Матрица RGBW, красный светодиод и фотодиод подключались к источнику питания через измеритель тока. Исследования проводились без дополнительных источников света.

Таблица 1. Технические характеристики многокристального RGBW светодиода.

Многокристальный RGBW светодиод серии MC-E	
1. Печатная плата	Фольгированный алюминий (МСРСВ)
2. Световой поток при 350 мА, не менее, лм	
• Синий	8,2 лм
• Зелёный	67,2 лм
• Красный	30,6 лм
• Холодный белый	100 лм
3. Угол обзора, град., мин	115°
4. Длина волны, нм (мин-макс)	
• Синий	450–465 нм
• Зелёный	520–535 нм
• Красный	620–630 нм
• Холодный белый	5700–7000 К
5. Максимальное значение тока I <sub>пр</sub> , мА	700 мА

Проводились экспериментальные сравнительные исследования фоточувствительности красного светодиода, (обладает спектральным диапазоном 420 – 632 нм и максимальной чувствительностью на длине волны 630 нм) и Si-фотодиода (обладает спектральным диапазоном 400–1100 нм и максимальной чувствительностью на длине волны 750–900 нм), сравнительные характеристики которых приведены на рис. 2а, 2б.

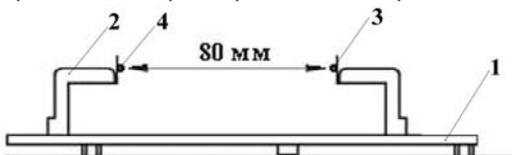


Рис. 1. Схема измерения сравнительных характеристик реверсивного тока красного светодиода и Si-фотодиода при облучении диодами матрицы RGBW: 1 – рельса; 2 – крепежные элементы; 3 – светодиодная матрица; 4 – красный светодиод или Si-фотодиод

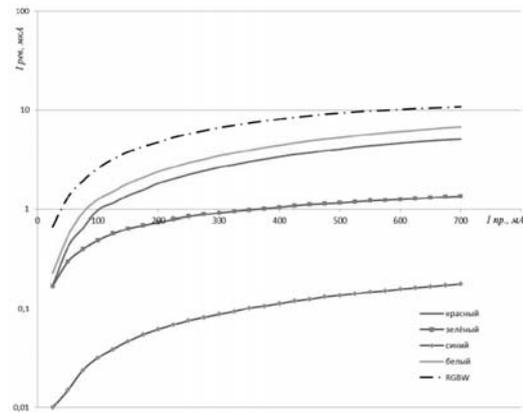


Рис. 2а. Измерение реверсивного тока красного светодиода при облучении диодами матрицы RGBW

Реверсивное включение светодиодных излучателей в качестве фоточувствительных датчиков излучения отдельных спектральных полос обеспечивает систему обратной связи сигналами которые поступают в микропроцессор. В высококачественных гетероструктурах светодиодов достигнута малая концентрация поверхностных состояний в интерфейсах, что позволяет получать высокую пороговую и спектральную чувствительность в светопринимающем режиме, достаточную для работы микропроцессора. При этом чувствительность в длинноволновой части селективного диапазона подавляется в  $10^3$ – $10^5$  раз (рис. 3) (табл. 2).

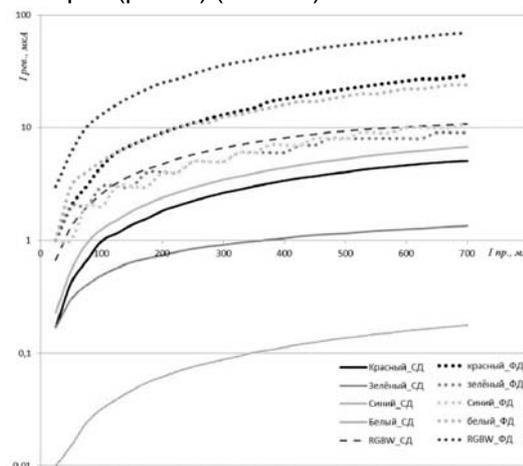


Рис. 2б. Сравнительные характеристики реверсивного тока красного светодиода и Si-фотодиода при облучении диодами матрицы RGBW

Высокая селективность может быть обеспечена соответствующей обработкой поверхности слоев, их толщиной и атомным составом.

Технологическими режимами получения гетероструктур можно обеспечить любую спектральную ширину фоточувствительности светодиодных структур в диапазоне длин волн, меньшем максимума полосы излучения. При этом проводится оптимизация структур как по квантовому выходу излучения, так и по фоточувствительности.

Таблица 2. Сравнение параметров фотоприемников получаемых реверсивным включением светодиодных гетероструктур

Параметры	Светочувствительная структура	Красный СИД, нулевое или обратн. включение	Инжекционный фотодиод $U_{пр} < U_{отс.}$	Зелён. СИД, включение 1,2	Голуб СИД	Лавинное включение RGB СИД, Si МОП	Реактивный фоточувствительный сенсор	Si- фотодиод
	1	2	3	4	5	6	7	
1	Спектральный диапазон, нм	420–632	420–640	400–520	350–420	400–800	350–660	900–400
2	Чувствительность, А/Вт	0,1	15	0,08	0,1	100	0,1	0,5–0,001
3	Усиление фототока, раз	–	Инжекц усил. 150	–	102	104	–	–
4	Длина волны макс. чувствительности, нм	630	–	510	425	410	–	880
5	Спектр. диапазон значительного снижения фотоотклика, нм	>650	>600	>525	>540	>420	>632	>1000
6	Снижение фотоотклика, раз	>5.103	>104	>104	>105	>104	>104	>102
7	Шунтирующее R, мОм	>100	>1	>100	>100	>100	>100	>100
8	Послед. R, кОм	<1	0,5	<1	<0,7	<2	<(0,5–2)	<1

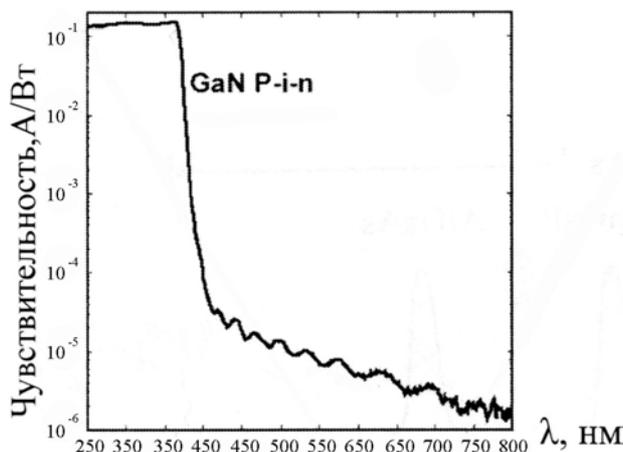


Рис. 3. Спектр чувствительности GaN p-i-n фотодиода

Реверсивное включение светодиодных структур обеспечивает селективность измерения светового потока отдельно красных, зеленых и синих светодиодов (рис.4) без применения фильтров, что особенно важно при интеграции с транзисторными схемами управления на кремнии, которые поддерживают заданное значение цветовой температуры (координат цветности на цветовой диаграмме). На рис. 4 рассмотрены структуры GaN (синяя область спектрального диапазона), InGaN (зеленая об-

ласть спектрального диапазона), AlInGaN (красная область спектрального диапазона) и Si- фотоприемник.

Исходя из спектральных характеристик области излучения светодиодов (1), селективной чувствительности фотоприемников (2) полученных методом зонной инженерии на соединениях  $A^3B^5$  и спектров источника белого света синтезированного из  $n$  светодиодов (3), представляется возможным утверждать, что не смотря на то, что Si- фотоприемник покрывает всю видимую об-

ласть излучения с максимальным значением в красной области спектрального диапазона и спадая к области фиолетового излучения, светодиодные структуры GaN, InGaN и AlInGaN обладают достаточной селективной чувствительностью в реверсивном режиме включения что может быть эффективно использовано для измерения интенсивности световых потоков каждого из цветов с помощью скважностей сигналов ШИМ.

Из графиков видно, что при малых световых потоках, выраженных соотношением  $I_{pr} = k\Phi$  (где  $k$  – коэффициент пропорциональности ток – световой поток) что составляет 50 мА, реверсивный фототок красного светодиода имеет небольшие значения порядка 0,01-0,9 мкА в сравнении с Si-фотодиодом у которого при аналогичном значении светового потока фототок составляет порядка 1-5 мкА. При увеличении светового потока происходит увеличение чувствительности гетероструктуры, что проявляется в увеличении реверсивного тока до значений 0,2-10,5 мкА при увеличении тока излучающей структуры до 700 мА. С увеличением световых потоков происходит насыщение фоточувствительности, однако во всем диапазоне величина реверсивного фототока достаточна для микропроцессора, который осуществляет управление переключательными элементами в цепях светодиодов.

Исходя из экспериментальных результатов можно прийти к выводу о возможности исполь-

зования диодных источников света в качестве фотоприемников для реверсивного режима включения с целью измерения интенсивности световых потоков каждого из цветов в периоды между импульсами сигналов ШИМ питания светодиодов. Использование светоизлучающих диодов в реверсивном режиме включения позволит осуществлять включение-выключение и регулирование светового потока интегрального источника света в зависимости от внешней освещенности, что обеспечит возможность реализации как радиоуправления так и автономной регулировки с помощью вшитых в микроконтроллер программ.

В этом варианте, программа микроконтроллера периодически производит измерения интенсивности световых потоков каждого из цветов и на основе полученных данных производит расчет скважностей сигналов ШИМ, управляющих питанием светодиодов. Замер интенсивности светового потока производится за время порядка нескольких микросекунд, что остается незаметным для человеческого глаза. Во время замера включаются светодиоды одного из цветов, при этом другие остаются погашенными. Таким образом, благодаря системе управления, независимо от внешних факторов и старения светодиодов яркость и баланс белого света лампы поддерживаются на постоянном или заданном уровне.

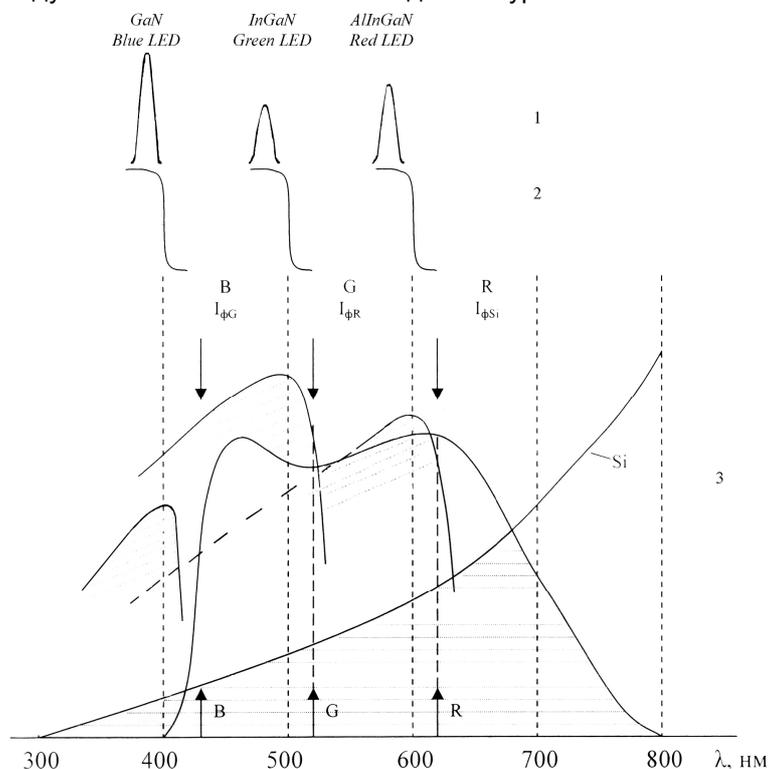


Рис. 4. Спектральные области излучения светодиодов (1); селективной чувствительности фотоприемников (2) полученных методом зонной инженерии на соединениях  $A^3B^5$ ; 3 – спектр источника белого света синтезированного из n светодиодов

## Выводы

1. Реверсивное включение светодиодных гетероструктур для регистрации параметров излучения в динамическом режиме позволяет регулировать с помощью встроенного микропроцессора интенсивность и частоту световых импульсов каждого заданного цвета и обеспечить интеллектуализацию самого процесса светодиодного освещения.

2. Чувствительность диодных источников света в реверсивном режиме включения с целью измерения интенсивности световых потоков каждого из цветов с помощью скважностей сигналов ШИМ является достаточным для применения в качестве фотоприемников.

3. Благодаря системе микропроцессорного управления с обратной связью по мощности светового излучения, независимо от внешних факторов и старения светодиодов, яркость и баланс белого света источника поддерживаются на постоянном или заданном уровне.

4. Временное разнесение процесса измерения мощности светового излучения RGB составляющих позволяет отказаться от применения фотоприемников со светофильтрами, что

позволяет реализовать источник белого света в виде гибридной или монокристаллической оптоэлектронной интегральной схемы.

5. RGB способ получения белого света позволяет управлять основными его параметрами как в процессе программирования микро-оптоэлектронных устройств при изготовлении так и при их эксплуатации, что недоступно всем другим источникам света.

## Литература

1. *Osinsky V.I., Murchenko, Hushmand. Si/A3B5 one chip integration of white LED sources 2009. – Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics. – 240-250 с.*
2. *Osinsky V.I. Information conception of image perception at solid-state lighting. Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics, 2007. – 30 с.*
3. *Осинский В.И., Радкевич А.И., Рубанчук А.Н. и др. Микропроцессорное управление диодными источниками белого света: Материалы 3-й всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия. Структуры и приборы», М.: МГУ, 2004. – 177 с.*