

УДК 621.315.592.2

П. В. Деминский<sup>1</sup>, В. И. Осинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины

«Киевский Политехнический Институт»,

Проспект Победы, 37, 03056, Киев, Украина

<sup>2</sup>НИИ Микроприборов НАН Украины

ул. Северо-Сырецкая, 3, 04136, Киев, Украина

## Влияние тепловых процессов в Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> RGB-матрицах светодиодов на реверсивное микропроцессорное управление освещением

*Обоснована необходимость внедрения монолитно интегрированных Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>-источников света. Проанализировано влияние динамики температурного изменения на реверсивный режим включения светодиодов в качестве фотоприемников в интегрированных Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>-источниках света. Исследовано влияние температурной динамики на длину волны, интенсивность излучения и цветовую температуру исследуемых образцов. Исследована сила света диодных источников видимого излучения в зависимости от температуры. Обоснована необходимость использования при реализации монолитных интегральных Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>-источников света нескольких светодиодов в разнесенные во времени моменты в реверсивном режиме включения.*

**Ключевые слова:** светодиодная матрица, монолитная интеграция, температурная динамика, реверсивное включение, RGB.

### 1. Вступление

Существует множество перспективных направлений, требующих реализации монолитной интеграции элементов A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> на Si. Одним из таких направлений является светодиодное освещение. Монолитная интеграция источников света, в том числе RGB-источников на Si предполагает совмещение на одном кристалле светодиодного конструктива с микропроцессорным управлением, обратной связью для контроля параметров светоизлучающих элементов, а также драйвера управления питанием. Интеграция источников света с элементами управления, питания и системой мониторинга является перспективным направлением, реализация которого требует детальных исследований.

© П. В. Деминский, В. И. Осинский

Одним из основных условий достижения качественной монокристаллической структуры на Si, является выбор и использование материалов с должной степенью соответствия их кристаллических решеток [1]. Между Si и соединениями A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>, таких как GaAs и GaN для уменьшения плотности дефектов и лучшего соответствия параметров решеток применяют буферные слои. Рассогласование кристаллических решеток кубического GaN и Si приблизительно 7–9 %, что нивелируется введением буферных темплетных слоев [2].

На основе экспериментальных и теоретических наработок, связанных с гибридной интеграцией элементов [3], возможна разработка и реализация монокристаллических интегральных схем на Si. Исполнение разработанных устройств в течение одного технологического цикла является существенным преимуществом монокристаллической интеграции, что дает возможность уменьшения размеров и снижения цены конечного продукта и делает монокристаллическую интеграцию предпочтительной в сравнении с другими технологическими решениями [4].

В данной статье исследуется зависимость длины волны излучения и цветовой температуры от приложенного тока и динамического роста температуры, а также термостимулированные потери излучения светодиодных (СИД) структур и использование светодиодных структур в фоточувствительном (реверсивном) режиме в цепи обратной связи микропроцессорного управления. Существенным преимуществом реверсивного микропроцессорного управления является возможность селективной фоточувствительности СИД-структур без оптических фильтров, интеграция которых затруднена.

Исследуемые образцы представляют собой структуры, выполненные по технологии эпитаксиального выращивания на SiC-подложках, излучающие в диапазонах синей и зеленой длин волн, ультрафиолетового светодиода, покрытого люминофором а также гетероструктуры AlInGaP, излучающие в диапазоне длин волн красного излучения, которые в совокупности с синим и зеленым светодиодами (СД) на выходе дают белый свет. Перспективным является реализация RGB-источников света на подложках Si с МОП (метал–оксид–полупроводник) транзисторами для системы управления (рис. 1).

Применение подложек SiC для создания высокоэффективных светодиодных кристаллов вполне обосновано по нескольким причинам. Первая — соответствие параметров кристаллических решеток. Вторая — высокая, по сравнению с сапфиром, теплопроводность материала, что обеспечивает эффективный отвод тепла из активной области кристалла при работе на высоких плотностях тока накачки. Третья — хорошее соответствие коэффициентов преломления материала подложки и структуры GaN [5]. В результате свет практически свободно распространяется в подложку, не испытывая эффекта полного внутреннего отражения на границе подложка–гетероструктура. В случае применения сапфировых подложек, характеризующихся значительно меньшим коэффициентом преломления, этот фактор существенно ограничивает вывод света из кристалла [6]. Структура и параметры элементов исследуемых СИД приведены в табл. 1.

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на характеристики излучения, является температура структуры. Падение эффективности светодиодов с ростом плотности тока выше  $J = 0,4–4 \text{ А/см}^2$  является одной из основных проблем в создании мощных осветительных светодиодных ламп на основе нитридов. Про-



косновением или излучением. При этом тепловое сопротивление  $R_\theta$  определяется как отношение разности температур тел к мощности  $P_d$ , рассеиваемой нагретым телом:

$$R_\theta = \frac{T_1 - T_2}{P_d} (\text{°C} / \text{Вт}).$$

При монолитной интеграции элементов на Si необходимо учитывать, что отвод тепла от светоизлучающих гетероструктур будет менее эффективен. Это вызвано меньшей свободной площадью для рассеяния тепла, а также температурой, выделяющейся из элементов управления, питания и мониторинга системы. Среди всего остального комплекса элементов чипа выделение тепла от самих диодных источников света является наиболее сильным. Поэтому важным является исследование влияния температуры на работу всего комплекса элементов, расположенных на одном чипе.

При подаче на СИД постоянного тока с течением времени конструктивные элементы устройства нагреваются, а интенсивность их излучения, хоть и не существенно возрастает, уменьшается или остается стабильной в зависимости от соотношения интенсивностей конкурирующих каналов излучательной и безизлучательной рекомбинации [8]. Рост температуры и интенсивности будет тем больше, чем больше подаваемый ток на СД. Такое изменение интенсивности излучения можно объяснить, рассматривая сопротивления контактов  $R_{\text{конт}}$  и сопротивление  $p$ - $n$ -перехода  $R_{p-n}$ , так как при нагревании ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ) контактов и  $p$ - $n$ -переходов будет уменьшаться. Из этого следует, что падение напряжения на  $R_{\text{конт}}$  и  $R_{p-n}$  будет аналогично уменьшаться, соответственно на светодиоде будет происходить увеличение разности потенциалов, что и приведет к увеличению интенсивности его свечения. При дальнейшем увеличении температуры перехода, а соответственно всего СИД-кристалла, световая эффективность уменьшается, цветовая температура увеличивается, показатели цветопередачи ухудшаются, и точка хроматичности смещается в длинноволновую сторону, и спектр уширяется.

В ранних работах [8, 9], посвященных исследованию возможностей монолитной интеграции на одном кристалле путем гибридной интеграции, было реализовано микропроцессорное управление соотношением мощности СИД, при котором точка монохроматичности не изменялась. Благодаря системе микропроцессорного управления с обратной связью по интенсивности светового излучения, независимо от внешних факторов и старения светодиодов, яркость и баланс белого света источника поддерживаются на постоянном уровне. Тем не менее, проблема изменения цветовой температуры и мощности излучения полностью не решена, так как под воздействием тепла параметры светодиода, работающего в реверсивном режиме включения, будут изменяться. Это объясняется изменением фоточувствительности гетероструктур, которыми в данном случае являются кристаллы СИД, включенные в реверсивном режиме.

Изменение спектральных характеристик и, как следствие, чувствительности от температуры светоизлучающих диодов, задействованных как в прямом, так и

обратном режиме включения, в основном обусловлено температурной зависимостью коэффициента собирания. Последняя определяется температурными изменениями коэффициента поглощения света,  $E_g$  полупроводника, диффузионной длины неосновных носителей. С увеличением температуры  $E_g$  уменьшается, и условия образования электронно-дырочных пар фотонами с меньшей энергией облегчаются. Другими словами, край собственного поглощения полупроводника смещается в длинноволновую область спектра. Под влиянием температуры наблюдается также изменение коэффициента поглощения света и соответственно изменение (уменьшение) глубины проникновения света в полупроводник. В результате поглощение света в различных рабочих режимах реверсивных светодиодов (РСИД) происходит по разному, и кривая изменения коэффициента собирания, а соответственно и спектральная характеристика при изменении температуры, имеют различный характер. С повышением температуры чувствительность в коротковолновой области спектра уменьшается. При этом чувствительность в длинноволновой области спектра увеличивается [10].

Влияние тепла, выделяющегося из каждого элемента и непосредственно действующего на соседние элементы, сказывается на параметрах работы каждого элемента. Характеристики работы светодиодных источников света и фотоприемников напрямую зависят от температуры данного элемента и соответственно влияния температуры окружающей среды. Поэтому для получения монолитных светоизлучающих структур высокого качества необходимо учитывать влияние окружающих элементов на работоспособность устройства в комплексе.

Для этого рассмотрим влияние теплового нагрева в частном случае светодиодной структуры, реализованной как светодиодный источник света и параллельно выполняющей функцию фоточувствительной структуры с ее реверсивным включением в заданные моменты времени для определения заданного баланса белого света. Исходя из этого, будет продемонстрирована необходимость дальнейшего расчета температурного распределения конечного варианта монолитной интегральной Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>-структуры источника света.

### **3. Экспериментальные исследования и обсуждение результатов**

Для исследований нами были выбраны:

- матрица N1 — сборка красного, синего, зеленого и белого кристаллов, помещенных в миниатюрной (площадью  $7 \times 9$  мм<sup>2</sup>) — совместимый 8-выводной корпус для поверхностного монтажа с низким тепловым сопротивлением — 3 С/Вт. Монтируется на печатную плату из фольгированного алюминия (МСРСВ);
- матрицы светодиодные N2, N3, содержащие красный и желтый светодиоды. Собраны по технологии сборки на гибком носителе Al-полиимид и смонтированные на алюминиевое основание посредством теплопроводящего компаунда 159–191.

#### **3.1. Экспериментальная установка, принцип работы**

Исследования проводились на лабораторной установке для исследования спектральных характеристик излучения. Излучение светоизлучающих образцов

проходило через систему фокусирующих линз, после чего попадало на входную щель монохроматора МДР-23. В качестве детектора излучения использовался фотоэлектронный умножитель 84-3 (ФЭУ), спектральный диапазон чувствительности дифракционной решетки которого 200–800 нм. Сигнал с ФЭУ фиксировался блоком регистрации сигнала, в качестве которого использовался амперметр.

Во время измерений светодиоды находились при комнатной и заданной температурах. Была определена зависимость энергии по всему спектру излучения от постоянного тока.

### **3.2. Исследования влияния температуры на интенсивность излучения светодиода**

Измерение заключалось в подаче на исследуемые образцы постоянного тока 100–600 мА с шагом 100 мА. Температура нагрева СИД определялась при помощи термопары и мультиметра. Для токов 100 мА и 200 мА измерения проводились на протяжении 15 минут; для 300 мА и 400 мА — 20 минут; для 500 мА — 25 минут; для 600 мА — 30 минут. После снятия значений при конкретном токе каждого светодиода, светодиоды отключались на 15–20 минут для их охлаждения.

Данная методика измерений позволяет фиксировать изменение температуры (нагрев) светодиода и изменение интенсивности его излучения с течением времени.

Таким образом, были сняты спектральные характеристики и исследовано влияние температуры на спектры излучения для матрицы N1 (синего, зеленого и красного кристаллов), а также матрицы N2. На этапе измерений определялась зависимость энергии в максимуме спектра излучения от постоянного тока и температуры. В результате исследований влияния температуры на интенсивность излучения светодиодов и длину волны излучения, были получены графики зависимости интенсивности излучения образцов от температуры и времени.

На графиках (рис. 2) наглядно видно смещение максимума в спектре излучения при изменении температуры ( $dEg/dT$ ), что объясняется температурной зависимостью ширины запрещенной зоны [11].

Исходя из полученных зависимостей длины волны от интенсивности излучения при заданных токах и динамическом смещении длины волны при росте температуры, с учетом прямой зависимости цветовой температуры от длины волны излучения, подтверждается изменение цветовой температуры светодиода с ростом температуры, что, безусловно, должно быть учтено при разработке монолитного светодиодного источника белого света на Si. Кроме того, динамика роста температуры со временем дает понимание необходимости расчета распределения тепла на кристалле.

### **3.3. Исследование освещенности реверсивных светодиодов в зависимости от температуры**

Для исследований были использованы такие основные исследовательские устройства как камера тепла-холода Мини Сабзеро MC-71 Tabai (Япония) и люксметр Ю-116.

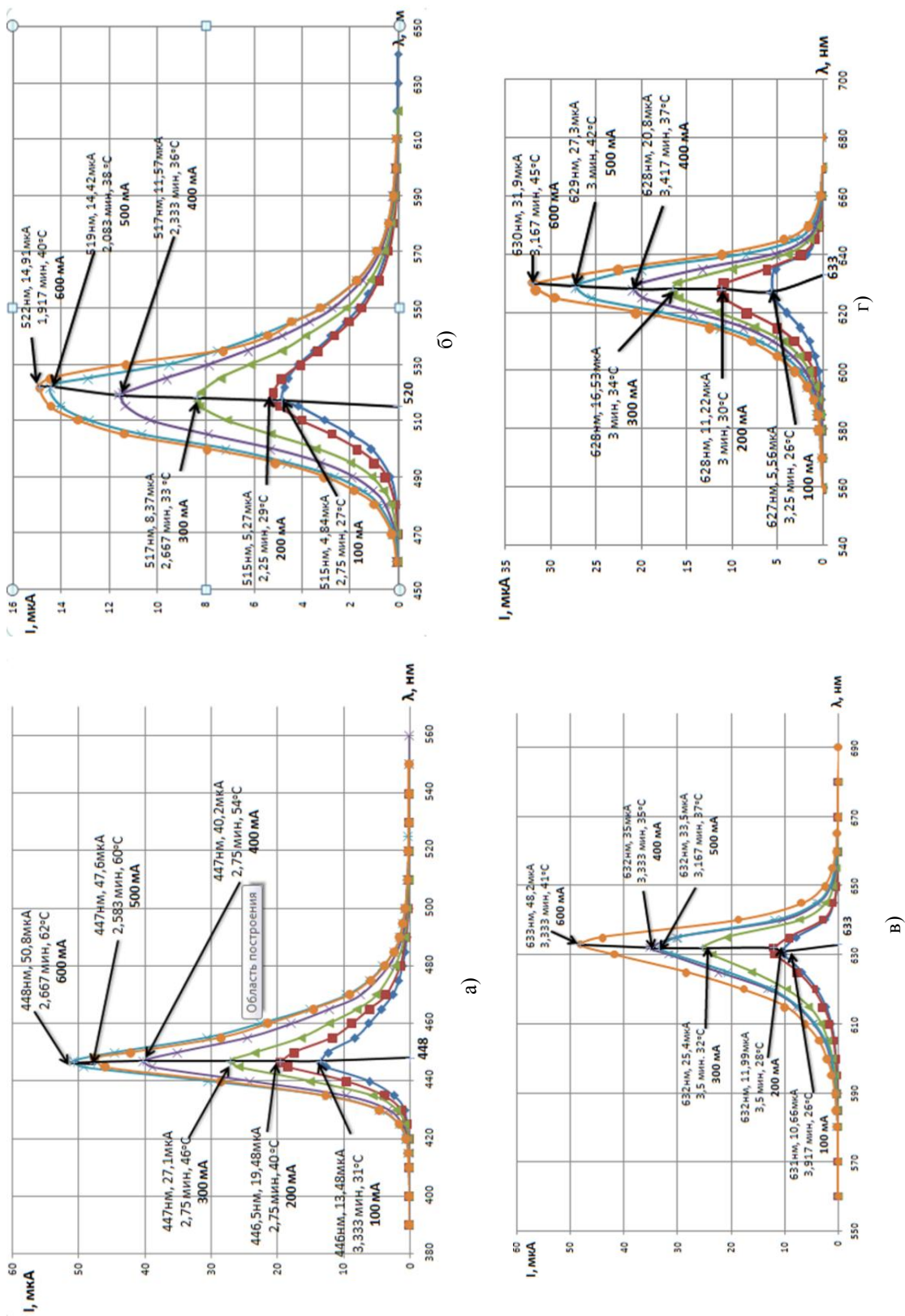


Рис. 2. Зависимости излучений: а) синего; б) зеленого; в) красного СИДов матрицы N1; г) красного СИДов матрицы N2 от длины волны

Исследования проводились при температурах от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$  и токах от 200 мА до 600 мА. При проведении эксперимента не измерялась абсолютная яркость светоизлучающего диода, так как данных измерений было достаточно для цели, которая преследуется в данной работе.

Из полученных значений зависимости ясно, что освещенность светодиодных структур при низких температурах значительно выше освещенности при более высоких температурах, и чем выше поднимается температура окружающей среды, тем сильнее в пропорциональных соотношениях уменьшается сила света. Для желтого СИД (N3), интенсивность излучения растет при увеличении тока до определенных значений. При значении тока выше 400 мА наблюдается уменьшение силы света вследствие перегрева образца. При таких токах, несмотря на постоянную температуру в камере и конвекцию воздуха, СИД нагревался выше заданных в камере температур. Исходя из аналогичных данных для зеленого светодиода, перегрев не наблюдается на всех значениях тока, для которых проводились исследования, что объясняется различными конструкционными вариантами исполнения светодиодных матриц.

Целью данных измерений было продемонстрировать зависимость освещенности, а соответственно и силы света от температуры диодных светоизлучающих структур.

В работе [13], была обоснована актуальность использования реверсивного включения светодиодов при монолитной интеграции Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> RGB-источников белого света. Реверсивное включение позволяет регулировать с помощью встроенного микропроцессора интенсивность и частоту световых импульсов каждого источника света и обеспечить интеллектуализацию процесса СД-освещения. Реализация данной способности призвана решить проблему уменьшения количества используемых элементов а, соответственно, и уменьшения количества технологических операций по изготовлению монолитного интегрального источника света.

С учетом результатов, полученных в процессе исследований влияния температурной динамики на длину волны излучения, интенсивность, цветовую температуру и силу света СИД, важно отметить необходимость использования нескольких светоизлучающих гетероструктур, поочередно работающих в прямом и реверсивном режимах включения. Причина тому — нагревание структуры, предназначенной для регистрации световых параметров других светоизлучающих элементов. Во-первых, данная гетероструктура во время включения в реверсивном режиме не учитывает изменения своих собственных параметров, связанных со световыми параметрами, и, во-вторых, при изменении температуры изменяется чувствительность элементов, работающих в качестве фотоприемника, что сказывается на корректности работы всего устройства [10]. Поэтому, в данной работе обосновывается важность использования нескольких РСИД в разнесенные во времени моменты в реверсивном режиме включения и необходимость дальнейших исследований температурного распределения на Si с учетом комплекса элементов, что является условием корректной работы устройства в целом.

Спектр излучения РСИД должен находиться в диапазоне длин волн больших или равных относительно светоизлучающих структур, значение световых параметров которых будет диагностироваться. Это способствует лучшему отклику на



изменение световых характеристик излучающих гетероструктур. Данные зависимости изображены на рис. 3.

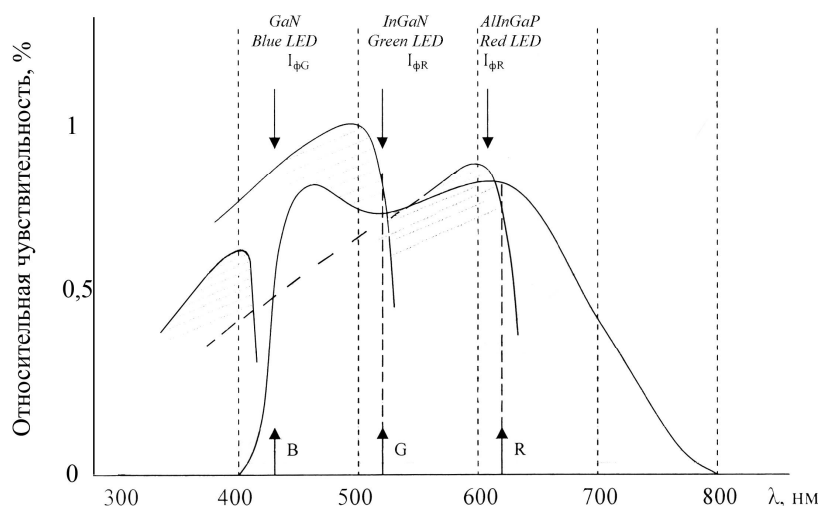


Рис. 3. Спектральные области излучения СИД RGB и их фоточувствительности в реверсивном режиме

Экспериментальные результаты исследований цветовой температуры светозлучающих гетероструктур по получению чистого белого цвета в диапазоне температур 4000–5000 К показали необходимость использования светодиодов красного, зеленого и синего цветов с соотношениями токов, представленными в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость цветовой температуры RGB-источника белого света от значения тока на каждом светодиоде

№	Зеленый (G), мА	Красный (R), мА	Синий (B), мА	Цветовая температура
1.	600	300	50	Холодный белый (~5000 К)
2.	600	400	40	Нейтральный белый (~3700 К)
3.	600	500	20	Теплый белый (~2600 К)

В результате, для получения нейтрального белого света, наиболее подходящего для восприятия зрительным аппаратом человека, необходимо либо выполнять соотношения, приведенные в табл. 2 (количество излучающих кристаллов одинаково), либо увеличивать количество СИД зеленого света в сравнении с остальными (при этом подавать одинаковый ток на все светодиоды). Исходя из этого, представляется возможным предложить следующую схематическую модель реализации интегрированного RGB-источника белого света в монолитном исполнении.

RGB-источник белого света [13] в монолитном исполнении на Si (рис. 3) содержит необходимое количество СИД красного, зеленого и синего цветов. При

подаче на  $R1$  импульсов тока с частотой  $F = 190$  Гц, скважностью  $T \approx 0,5$  и средним значением, которое равняется выбранной рабочей точке каждого светодиода, он излучает красный свет [9]. В моменты времени, когда  $R1$  работает как селективный фотоприемник в реверсивном режиме включения данная гетероструктура регистрирует показания световых параметров окружающей среды, включая показания излучения  $R2$ ,  $G$ ,  $B$  источников света. Микропроцессор запрограммирован на поддержание импульсов RGB-светодиодов таким образом, чтобы результирующее излучение соответствовало белому свету с цветовой температурой в диапазоне 2600–6500 К. С учетом возможного изменения излучения  $R1$ , и, как следствие, изменения цветовой температуры всего RGB-источника белого света, в системе, в качестве второго селективного фотоприемника используется светоизлучающий диод  $R2$ , принцип работы, частота и скважность которого идентична  $R1$ . Предназначение  $R2$  заключается в проверке световых характеристик  $R1$  и внесении корректировок по току в случае их изменения. Реализация устройства с  $R1$  и  $R2$  в качестве РСИДов обусловлена большей чувствительностью AlInGaP гетероструктуры, реализованной в красных СИД в качестве активного слоя, к диапазону зеленой и синей длин волн (рис. 2). В предложенной модели возможно использование  $n$ -го количества СИД-структур в зависимости от задач и целей конечного устройства.

В результате микропроцессорного управления обеспечиваются заданные параметры работы источника освещения и их стабильность во времени и изменения параметров окружающей среды.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Исследованы зависимости длин волн излучения, цветовой температуры образцов от приложенного тока, а также термостимулированные потери излучения светодиодных структур, на основании чего предложен вариант реализации монолитных интегральных Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>-источников света с использованием нескольких светоизлучающих диодов в определенные моменты времени, не заметные для глаза в реверсивном режиме включения.

2. Определено изменение фоточувствительности реверсивного светодиода при увеличении температуры и его влияние на процессы моделирования и работу монолитных интегральных Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>-источников света.

3. Обоснована необходимость использования при реализации монолитных интегральных Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>-источников света нескольких светодиодов в разнесенные во времени моменты в реверсивном режиме включения РСИД.

4. Предложено реверсивное микропроцессорное управление Si/A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> RGB-источниками белого света в монолитном исполнении.

1. Масол И.В. Информационные нанотехнологии / Масол И.В., Осинский В.И., Сергеев О.Т. — К.: Макрос, 2011. — 560 с. — ISBN 978-966-2022-39-1.

2. На пути создания умного освещения интеграцией Si/III-N светодиодных структур / Осинский В.И., Масол И.В., Ляхова Н.Н., Деминский П.В // Материалы 8-й Всероссийской конф. «Нитриды галлия, индия, алюминия — структуры и приборы». — С.-Пб., 2011. — С. 190–191.

3. *Осинский В.И.* Технологическая и функциональная интеграция мощных светодиодов на тринитридах и фосфидах / Осинский В.И., Вербицкий В.Г., Тучинский И.А. // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники».* — Ч. 1. — 2008.
4. *Osinsky V.* Si/A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> One Chip Integration of White LED Sources / V. Osinsky, D. Murchenko, H. Nonarmand // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* — 2009. — Vol. 12, N 3. — P. 240–250.
5. *Hunsperger R.G.* Integrated Optics, Theory and Technology / R.G. Hunsperger / — Berlin: Springer, 1995. — P. 2–10.
6. *Шуберт Ф.* Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. — 2-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 129 с. ISBN 978-5-9221-0851-5.
7. *Милнс А.* Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник / А. Милнс, Д. Фойхт. — М.: Мир, 1975. — 432 с. ISBN 5-256-01177-2.
8. *Osinsky V.I.* Density-of-States Tails Associated with the 100 Conduction Band Minima in Heavily Doped *n*-type GaAs / V.I. Osinsky, N.N. Winogradoff // *Solid State Communications.* — 1 December 1970. — Vol. 8. — Issue 23. — P. 2001–2003.
9. *Микропроцессорное управление диодными источниками белого света* / Осинский В.И. Радкевич А.И., Рубанчук А.Н. [и др.] // III Всероссийская конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». — М.: МГУ, 07–09 июня 2004. — С. 166–167.
10. Туннельно-рекомбинационные токи и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN светодиодов / [Бочкарева Н.И. Жирнов Е.А., Ефремов А.А. и др.] // *ФТП.* — 2005. — Т 39. — Вып. 5. — С. 627.
11. *Завалишин В.А.* Особенности программного обеспечения микропроцессорного управления RGB источниками белого света на интегральных матрицах светодиодов / В.А. Завалишин, А.И. Радкевич, Д.С. Мурченко // *Электроника и связь.* — 2008. — № 1. — С. 80–84.
12. *Бузанова Л.К.* Полупроводниковые фотоприемники / Л.К. Бузанова, А.Я. Глиберман. — М.: Энергия, 1976. — С. 21.
13. *Деминский П.В.* Селективная фоточувствительность при реверсивном включении светодиодов в интегральных RGB источниках белого света / П.В. Деминский // *Электроника и связь.* — 2011. — № 3. — С. 14–18.

Поступила в редакцию 31.05.2012