

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

*Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А.*

### СВЕТОТРАНЗИСТОР

*Ismailov T.A., Gadjiyev H.M., Gadjiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A.*

### SVETOTRANZISTOR

*В статье рассмотрена возможность сформировать один p-n-переход биполярного транзистора в виде светоизлучающего, что позволит повысить степень интеграции сверхбольших интегральных схем за счет уменьшения тепловыделений.*

**Ключевые слова:** *светотранзистор, излучающий p-n-переход, тепловой пробой.*

*In this article the opportunity to form a pn-junction bipolar transistor as a light-emitting, which will increase the degree of integration of large scale integrated circuits by reducing heat gain.*

**Key words:** *svetotranzistor, emitting p-n-junction, thermal breakdown.*

Одной из основных тенденций развития современной электронной техники является микроминиатюризация электронных компонентов интегральных схем. Главным препятствием на пути повышения степени интеграции является опасность температурных ударов за счет увеличения удельного тепловыделения. Применение систем охлаждения за счет громоздкости и инерционности контрпродуктивно. Также свои сложности имеются у криоэлектроники в области сверхпроводимости. Обобщая перечисленные недостатки современных электронных схем можно констатировать, что все электронные компоненты в большей или меньшей степени являются источниками тепловыделения, а все системы охлаждения, при локальном создании ограниченной зоны охлаждения, требуют гораздо большую зону для отвода тепла в виде кондукции, конвекции или излучения. При создании новых электронных компонентов традиционно в качестве основных критериев рассматриваются быстродействие, габариты, энергопотребление и т.д. и в последнюю очередь, по остаточному принципу, уровень тепловыделений активных и пассивных компонентов электронных схем.

Вместо того, чтобы констатировать заданный уровень тепловыделений и выбирать по факту параметры системы охлаждения, целесообразно проводить анализ теплофизических процессов в электронных компонентах для принятия конструктивных и технологических решений для снижения уровня тепловыделений.

Традиционные методы отвода тепла в виде кондукции, конвекции и излучения практически исчерпали себя при конструировании сверхбольших интегральных схем. В то же время современные электронные компоненты позволяют модифицировать отвод тепла для перспективных разработок. Отвод тепла в виде излучения подразумевает трансформацию теплового движения атомов при соударении в изменении энергетических уровней электронов в атоме в большую сторону, а при возвращении на исходную орбиту разница между энергетическими уровнями преобразуется в электромагнитное энергоизлучение.

Причем, чем выше температура, тем большую энергию приобретают атомы при соударении и тем выше энергия электромагнитных квантов и выше их частота.

Несмотря на то, что отвод тепла в виде излучения имеет ряд преимуществ (безинерционность, эффективность и т.д.), главным недостатком является необходимость

повышения рабочих температур до диапазонов, при которых наступают тепловые пробои электронных компонентов. При меньших температурах отвод энергии незначителен. Поэтому отвод тепла в виде излучения редко используется в традиционных схемах охлаждения.

С появлением светодиодов возникла возможность модифицировать систему охлаждения для отвода тепла в виде излучения. В светодиодах излучение возникает не за счет нагрева кристаллической решетки, а за счет рекомбинации электронов и дырок и испускание излучения за счет разницы в энергии свободного электрона и электрона в составе атома после рекомбинации. В этом случае тепло не выделяется. Наоборот, появляется возможность дополнить известный эффект Пельтье в ТЭУ для получения эффективного охлаждения.

Известен способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения [1], в котором используются светодиодные излучатели, предназначенные для преобразования тепловой энергии, поступившей с холодных спаев термомодуля в виде электрического тока в энергию излучения.

В основе светотранзистора лежит структура, представляющая собой соединенные последовательно три полупроводниковые ветви (рис. 1) первая и третья из которых обладает электронной ( $n$ ), а вторая дырочной ( $p$ ) проводимостью для  $n$ - $p$ - $n$  транзистора или наоборот для  $p$ - $n$ - $p$  транзистора.

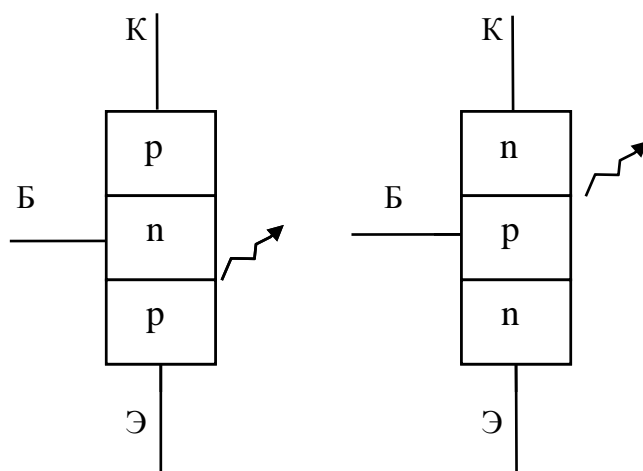
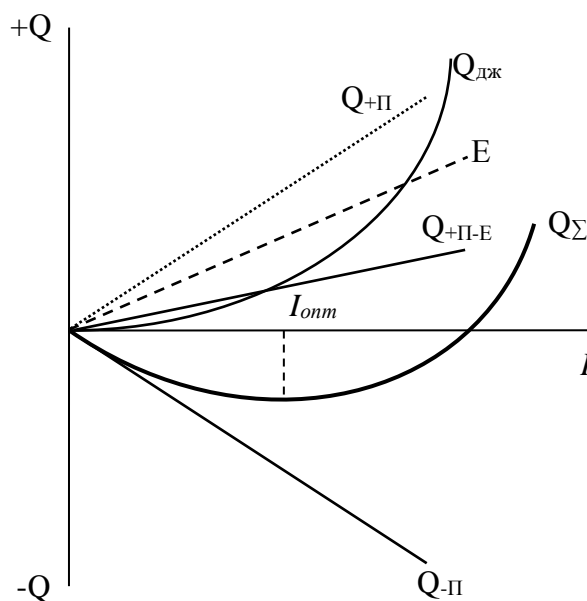


Рисунок 1 - Светотранзистор с  $p$ - $n$ - $p$  и  $n$ - $p$ - $n$ -структурой

В отличие от обычного биполярного транзистора один  $p$ - $n$ -переход сформирован в виде светоизлучающего [2]. Для  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора излучающим переходом является база – эмиттер, для  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора – база-коллектор. Если электрон перемещается через переход с потерей энергии, то эта энергия выделяется в виде тепла или излучения, а если с приобретением энергии, то теплота поглощается на этом переходе. В обычных транзисторах количество выделяемого тепла превышает количество поглощаемого, поэтому в процессе работы транзисторы нагреваются, и чем больше ток, тем больше нагрев. В светоизлучающем переходе можно подобрать ток таким образом, что джоулевые тепловыделения оказываются меньше термоэффекта и часть энергии превратится в излучение. В этом случае в транзисторе вместо выделения тепла в переходе часть энергии будет превращена в излучение и уйдет в окружающую среду, а второй переход транзистора поглотит такое количество тепла, что общая температура транзистора станет меньше и вместо нагрева транзистор будет охлажден.

При прохождении сквозь светотранзистор (например:  $p$ - $n$ - $p$ -структуры) постоянного электрического тока от эмиттера к коллектору через базу, возникает разность температур,

обусловленная выделением тепла Джоуля и испусканием излучения на переходе эмиттер-база и выделением тепла Джоуля и поглощением теплоты Пельтье на переходе база-коллектор.



**Рисунок 2** - Зависимость тепла от величины питающего тока  $I$

- $Q_{\Sigma}$  - тепловой баланс светотранзистора;
- $Q_{дж}$  - эффект Джоуля;
- $Q_{-П}$  - охлаждающий эффект Пельтье на переходе база-коллектор;
- $Q_{+П}$  - нагревающий эффект Пельтье на переходе эмиттер-база;
- $Q_{+П-Е}$  – результирующее тепло на переходе эмиттер-база;
- $E$  - энергия излучения.

На рис. 2 приведена зависимость тепла от величины питающего тока  $I$ , приходящего на светотранзистор за счет эффекта Джоуля  $Q_{дж}$ , охлаждающего эффекта Пельтье  $Q_{-П}$  (переход база-коллектор), нагревающего эффекта Пельтье  $Q_{+П}$  (переход эмиттер-база), результирующее тепло на переходе эмиттер-база  $Q_{+П-Е}$  и энергии излучения  $E$ , где  $Q_{+П-Е}$  находится как разница нагревающего эффекта Пельтье и энергии излучения, отводимого в окружающую среду:

$$Q_{+П-Е} = P_{ЭБ}It - E. \quad (1)$$

Поскольку эти эффекты имеют место в одной электрической цепи, складывая их алгебраически, получаем результирующую кривую  $Q_{\Sigma}$  которая характеризует тепловой баланс светотранзистора при различных значениях питающего тока.

Кривая  $Q_{\Sigma}$  имеет минимум, соответствующий оптимальному току  $I_{опт}$ , при котором имеет место максимальное понижение температуры на светотранзисторе. Благодаря пологому минимуму кривой  $Q_{\Sigma}$  максимальное охлаждение, создаваемое светотранзистором, не очень резко зависит от изменения питающего тока. В реальных конструкциях светотранзисторов изменение силы тока на  $\pm 10\%$  от оптимального значения практически не сказывается на степени охлаждения:

$$Q_{\Sigma} = I^2Rt - P_{БК}It + P_{ЭБ}It - E, \quad (2)$$

где  $P_{БК}$  - коэффициент Пельтье охлаждающего перехода светотранзистора;  
 $P_{ЭБ}$  - коэффициент Пельтье нагревающего перехода светотранзистора;  
 $R$  - сопротивление светотранзистора.

Для определения условий, при которых светотранзистор создает максимальное понижение температуры, требуется провести сравнительный анализ электротеплофизических свойств. Чем меньше теплота Джоуля, тем более низкие температуры можно получить. Так как сопротивление светотранзистора зависит от геометрических размеров и удельного сопротивления, то при изготовлении светотранзистора в виде тонкопленочной структуры можно сделать теплоту Джоуля практически незначимой. Другим показателем, влияющим на снижение температуры является степень преобразования в излучение электронного потока. Чем больше доля излучения и выше его частота (вплоть до ультрафиолетового диапазона), тем больше энергии будет мгновенно отведено в окружающую среду и тем самым можно так подобрать параметры светотранзистора, что охлаждающий эффект Пельтье вместе с энергией излучения окажут большее влияние на светотранзистор, чем выделения тепла Джоуля и остаток нагревающего эффекта Пельтье. В этом случае непрерывное воздействие охлаждающего интегрального эффекта на светотранзистор будет планомерно понижать его температуру теоретически до абсолютного нуля (при соответствующей теплоизоляции от окружающей среды). Причем после достижения сверхпроводимости эффект Джоуля полностью исчезнет ( $R=0$ ), а эффект Пельтье и излучение останутся. Дополнительным преимуществом является возможность рекуперации энергии излучения при помощи солнечных батарей для обеспечения эффективных режимов энергосбережения на основе электронных схем с применением светотранзисторов.

Это особенно важно для интегральных схем с высокой степенью интеграции, так как позволяет разместить большее число компонентов на единицу площади. Кроме того, дополнительным преимуществом является полное отсутствие тепловых пробоев. Уменьшение тепловых выделений позволяет исключить вероятность теплового пробоя транзистора. Таким образом, система охлаждения транзистора оказывается неотъемлемой составной частью самого транзистора, причем отвод тепла происходит практически безинерционно со скоростью света. Оптические свойства транзистора позволяют интегрировать его в оптронные схемы. Недостатком транзистора являются ограниченные режимы оптимальных токов. Однако это практически не мешает использовать его в дискретных схемах для цифровой электроники.

В качестве материалов для изготовления светотранзистора могут быть использованы любые материалы, традиционно используемые при изготовлении светодиодов, а именно : фосфид галлия (GaP), нитрид галлия (GaN), карбид кремния (SiC).

Разработанный светотранзистор является логическим продолжением развития светодиодных компонентов и имеет широкие перспективы для применения в сверхбольших интегральных схемах.

#### **Библиографический список:**

1. Патент РФ №2405230. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Оpubл. 27.11.2010. Бюл. №33.
2. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Оpubл. 10.07.2013. Бюл. №19.