

Исследование КПД преобразования оптического излучения GaAs-фотопреобразователями

В.К.Киселев¹, Г.Н.Семьин, А.Н.Труфанов

НИИ Измерительных систем им. Ю.Е.Седакова
Нижний Новгород 603950, ГСП-486, Россия

С.В.Оболенский²

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия

Рассмотрены основные факторы, влияющие на работу и КПД GaAs-фотопреобразователей. Показано, что длина волны лазерного излучения должна быть в пределах 0,81–0,86 мкм. Основное влияние на КПД преобразования оказывают толщина и уровень легирования рабочего p-слоя. Даны рекомендации по конструкции GaAs-фотопреобразователей.

Принцип преобразования оптической мощности в электрическую состоит в разделении генерируемых светом носителей заряда во встроенном поле p-n перехода. КПД преобразования зависит от трех факторов [1]:

- чем большая часть оптического сигнала поглощается в рабочей области преобразователя, тем больше КПД;
- чем меньшая часть генерируемых светом электронов и дырок успевает рекомбинировать до их пространственного разделения во встроенном поле перехода, тем выше КПД;
- чем меньше паразитные сопротивления, тем больше КПД.

Ниже рассмотрены основные факторы, влияющие на работу и КПД GaAs-фотопреобразователей, а также предложен вариант их конструкции.

Стандартная структура GaAs-фотопреобразователя приведена на рис.1 [1]. На рисунке не показаны пассивирующее и антиотражающее покрытия.

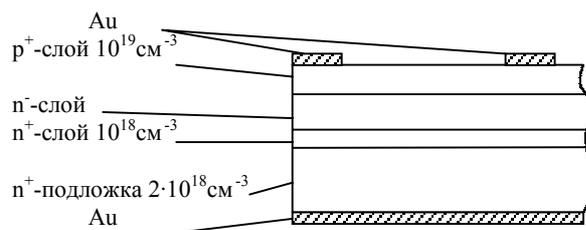


Рис.1

¹ Тел.: +7-8312-666130

² Тел.: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

Структура полупроводникового фотопреобразователя изготавливается на проводящей p^+ -подложке. На подложку эпитаксиальным способом наносится сильнолегированный буферный слой для улучшения качества последующих эпитаксиальных слоев. Так как паразитные сопротивления подложки и буферного слоя малы, то их толщина не влияет на работу прибора и обычно варьируется от 300 до 400 мкм для подложки, и от 0,5 до 2 мкм для буферного слоя. Рабочую область в GaAs-фотопреобразователях, как правило, выбирают n -типа, поскольку подвижность электронов существенно выше, чем подвижность дырок. Для формирования p - n перехода сверху в этом случае располагается тонкий p^+ -слой. Проводимость последнего должна быть максимально высокой, для создания качественного омического контакта с металлическими полосками, напыляемыми на поверхность слоя. Состав примесей, используемых для легирования p - и n -слоев не важен с точки зрения работы преобразователя, но важно качество изготовления полупроводниковых слоев, т.е. их бездефектность. Как следует из вышесказанного, основное внимание при оптимизации конструкции p - n -фотопреобразователя должно быть обращено на толщину и уровень легирования рабочего n -слоя.

Рассмотрим требование отсутствия рекомбинации в рабочем слое. Поскольку уровень легирования рабочего слоя существенно ниже чем у p^+ -слоя, то обедненная область p - n -перехода, в основном, расположена в n -слое. Величина обедненной области определяется уровнем легирования и составляет для 10^{15}см^{-3} около 1 мкм, для 10^{16}см^{-3} – 0,35 мкм, для 10^{17}см^{-3} – 0,13 мкм. В остальной части n -области концентрация электронов равна концентрации примеси, а при поглощении света дырки будут эффективно рекомбинировать с электронами и не дадут вклада в преобразование энергии (произойдет тепловой нагрев полупроводника). Таким образом, толщина рабочей области должна быть не меньше величины, определяемой поглощением света в материале. Однако и больше ширины обедненной области ее делать не следует, так как это приведет к увеличению паразитного сопротивления структуры. Последнее особенно важно для $n=10^{16}\text{см}^{-3}$ и ниже. При уровне легирования $n=10^{17}\text{см}^{-3}$ это условие не столь критично, и толщина n -слоя может составлять несколько микрометров.

При конструировании фотопреобразователя особое внимание нужно уделить требованию к длине волны лазерного излучения.

Табл. 1

Зависимость поглощения ИК-излучения в GaAs от длины волны.

| Длина волны, мкм | 0,91 | 0,89 | 0,87 | 0,85 | 0,8 |
|--|------|------|------|------|-----|
| Поглощенная мощность в слое толщиной 0,1 мкм, % от падающей на поверхность | 0,01 | 0,1 | 1 | 10 | 50 |
| Поглощенная мощность в слое толщиной 1 мкм, % от падающей на поверхность | 0,1 | 1 | 10 | 90 | 100 |
| Поглощенная мощность в слое толщиной 10 мкм, % от падающей на поверхность | 1 | 10 | 90 | 100 | 100 |

Область, в которой генерируются электроны и дырки, геометрически совпадает с областью, в которой поглощается свет. Поскольку GaAs является прямозонным полупроводником, то глубина поглощения света сильно зависит от длины волны. Это иллюстрируется справочными данными, приведенными в табл.1. Как видно из таблицы, для длины волны лазерного излучения равной, например, 0,85 мкм, оптимальная толщина рабочей области прибора будет составлять около 1 мкм.

Как следует из вышеизложенного, для эффективной работы преобразователя излучение должно поглощаться в n^- -области. Поскольку толщина p^+ -области должна быть не менее 0,1 мкм, для уменьшения паразитного сопротивления в направлении “вдоль поверхности” до металлического контакта длина волны лазерного излучения должна быть не менее 0,8–0,81 мкм. В противном случае свет поглотится в p^+ -слое. С другой стороны, поскольку изготовление слоев GaAs с концентрацией примеси менее 10^{15} см^{-3} технически затруднено, то длина волны лазерного излучения не должна быть более 0,86–0,87 мкм.

Для экспериментальной отработки оптимальной конструкции были изготовлены структуры трех типов с концентрацией n^- -слоя 10^{15} , 10^{16} , 10^{17} см^{-3} и толщиной 1, 0,5, 0,2 мкм, соответственно. Технологические характеристики слоев предлагаемой конструкции фотопреобразователя сведены в табл.2.

Табл.2. Характеристики слоев GaAs фотопреобразователя

| Характеристики слоя | | Толщина, мкм |
|---|-----------|--------------|
| Au, сетка с шириной полос 20 мкм на расстоянии 400 мкм | | 1,0÷2,0 |
| p^+ -слой с концентрацией 10^{19} см^{-3} | | 0,1 |
| n^- -слой с концентрацией, см^{-3} | 10^{15} | 1,0 |
| | 10^{16} | 0,5 |
| | 10^{17} | 3,0 |
| n^+ -слой с концентрацией 10^{18} см^{-3} | | 0,5 |
| n^+ -подложка с концентрацией $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ | | 320 |

Конструктивно элемент фотоэлектрического преобразователя представляет собой чип GaAs структуры, размером 3×3 мм, что показано на рис. 2.

На нижнюю поверхность подложки наносится электрод в виде слоя золота толщиной 1...2 мкм, к которому приваривается один из выводов элемента фотоэлектрического преобразователя. Второй электрод выполняется в виде сетки, которая наносится на p^+ -слой. Сетка выполнена напылением золотых проводников шириной 20 мкм, толщиной 1...2 мкм. Расстояние между проводниками – 300 мкм.

Потери при преобразовании энергии излучения в электрическую энергию, выделяющуюся на нагрузке фотоэлемента, могут быть подразделены на:

- световые потери;
- энергетические потери.

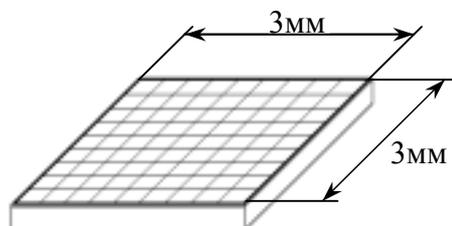


Рис. 2
Конструкция одного элемента фотоэлектрического преобразователя

Световые потери – это, прежде всего, потери на отражение лучистого потока от поверхности фотоэлемента. Они сказываются на величине квантового выхода Y , рассчитанного на падающий световой поток:

$$Y = Y' \cdot (1 - R).$$

Здесь R – коэффициент отражения; Y' – квантовый выход фотоэффекта, рассчитанный на поглощенный световой поток, то есть отношение числа образованных пар носителей тока к числу поглощенных фотонов.

Таким образом, чем больше коэффициент отражения R , тем меньше квантовый выход Y , рассчитанный на падающий световой поток.

Кроме того, не весь поглощенный в полупроводнике световой поток образует свободные пары носителей тока. Часть потока поглощается нефотоэлектрически (экситонное поглощение, поглощение с возбуждением колебаний решетки (образованием фононов), поглощение доли светового потока, прошедшего на большую глубину и т. д.).

Энергетические потери – потери количества возбужденных светом пар электронов и дырок или переносимой ими энергии. Эти потери обусловлены рекомбинацией носителей, не дошедших до контактов фотопреобразователя. Рекомбинационные потери зависят в значительной мере от конструкции фотоэлемента.

Кроме того, в цепи работающего с внешней нагрузкой фотоэлемента можно отдельно определить потери энергии по току и напряжению. Токовые потери происходят в результате утечки части носителей через запирающий слой в прямом направлении. Их можно оценить величиной шунтирующего фотоэлемент сопротивления утечки или внутреннего сопротивления запирающего слоя, составляющего обычно несколько килоом. Под потерями по напряжению понимают падение напряжения на паразитных сопротивлениях, включенных последовательно с нагрузкой, на сопротивлении слоев полупроводника и контактов с электродами.

Полный КПД преобразователя, определяющийся как внутренними потерями, так и выбором режима работы [1,2]:

$$\eta = \frac{I \cdot U_R}{F}, \quad (1)$$

где I , U_R – ток и напряжение на нагрузке; F – мощность падающего светового потока.
 Это же выражение, представленное более подробно [2]:

$$\eta = \frac{kT\beta Y}{h\nu} \cdot \frac{I}{I_\phi} \ln\left(1 + \frac{I_\phi - I}{I_s}\right), \quad (2)$$

где β – коэффициент собирания пар носителей; Y – квантовый выход фотоэффекта (тем больший, чем меньше коэффициент отражения); I_ϕ – ток через р-п-переход избыточных неосновных носителей; I_s – ток насыщения контактного перехода.

Из формулы (2) видно, что КПД увеличивается при увеличении множителей: Y – квантового выхода фотоэффекта и β – коэффициента собирания пар носителей. КПД тем больше, чем меньше I_s – ток насыщения контактного перехода, то есть чем меньше равновесная концентрация неосновных носителей в полупроводнике (чем меньше количество загрязняющих примесей, образующих неосновные уровни).

Зависимость КПД от режима работы фотопреобразователя определяется соотношением между величинами I и $I_{\phi=I_{кз}}$ ($I_{кз}$ – ток короткого замыкания). Она достигает максимума при вполне определенной величине сопротивления нагрузки.

График вольтамперной характеристики освещенного фотоэлектрического преобразователя приведен на рис.3 [1]. Чаще вольтамперную характеристику фотоэлектрического преобразователя изображают так, как показано на рис.4.

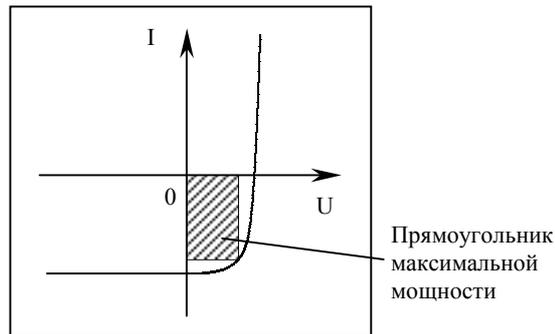


Рис. 3
 Вольтамперная характеристика освещенного фотоэлектрического преобразователя.

Мощность, выделяющаяся на сопротивлении нагрузки, может быть представлена как площадь прямоугольника, вписанного в вольтамперную характеристику фотопреобразователя. При соответствующем подборе нагрузочного сопротивления она может достигать 80% произведения $I_{кз} \cdot U_{хх}$ [1] ($I_{кз}$ – ток короткого замыкания, $U_{хх}$ – напряжение холостого хода элементов). I_m и U_m (показаны на рис.5) – значения тока и напряжения, при которых реализуется максимальная выходная мощность.

Таким образом, исходя из формулы (1), можем записать максимальный КПД фотопреобразования с учетом выбора режима работы:

$$\eta = I_m \cdot U_m / F ;$$

или приближенно:

$$\eta = 0.8 \cdot I_{кз} \cdot U_{хх} / F. \quad (3)$$

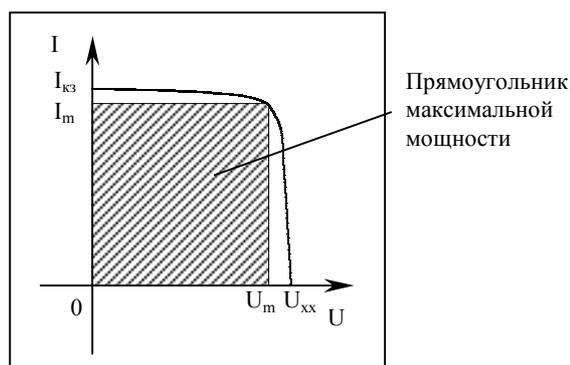


Рис. 4
Общепринятое изображение вольтамперной характеристики освещенного фотоэлектрического преобразователя.

Таким образом, при известной мощности излучения ИК-светодиода, токе короткого замыкания и напряжении холостого хода фотопреобразователей можно вычислить КПД преобразования для известной мощности светового потока. При этом необходимо учитывать, что в соответствии с формулой (2) КПД фотопреобразования будет зависеть от квантового выхода фотоэффекта Y , (то есть от расположения и апертуры ИК-светодиода).

Исследования изготовленных образцов проводились с помощью измерителя характеристик полупроводниковых приборов Л2-56.

В табл.3 приведены результаты измерений $I_{кз}$ и $U_{хх}$, а также вычисленный по формуле (3) КПД преобразования. При этом мощность излучения ИК-светодиода марки АЛ118, измеренная с помощью блока индикации ОМК3-76, составляла 2,7 мВт. Поскольку, как говорилось выше, на КПД преобразования влияет расположение излучателя и его апертуры, то расположение ИК-светодиода выбиралось с точки зрения максимальных значений $I_{кз}$ и $U_{хх}$. Максимальный КПД преобразования получился при непосредственной близости ИК-светодиода от кристалла фотопреобразователя. Как видно, вычисленные значения КПД преобразования отличаются незначительно. Чуть ниже он у образцов с концентрацией примеси 10^{17} см^{-3} .

Результаты измерений $I_{кз}$ и $U_{кк}$, вычисленный КПД преобразования образцов фотопреобразователей

| n ⁻ слой, конц-я, см ⁻³ толщина, мкм | 10 ¹⁵ | | | 10 ¹⁶ | | 10 ¹⁷ | | |
|---|------------------|------|------|------------------|------|------------------|------|------|
| | 1,0 | | | 0,5 | | 3,0 | | |
| № образца | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $U_{кк}$, В | 0,68 | 0,66 | 0,60 | 0,53 | 0,39 | 0,53 | 0,42 | 0,44 |
| $I_{кз}$, мА | 0,47 | 0,45 | 0,45 | 0,55 | 0,54 | 0,50 | 0,47 | 0,49 |
| КПД преобр-я, % | 9,47 | 8,80 | 8,00 | 8,64 | 6,24 | 7,85 | 5,84 | 6,39 |

КПД фотопреобразования получился достаточно низким (для перспективных изделий необходим КПД порядка 30%), что обусловлено большими энергетическими потерями, связанными с отражением света от поверхности образцов.

Отражение от кристалла можно значительно уменьшить с помощью антиотражающего покрытия, а также сделав пучок света параллельным. Таким образом, можно ожидать, что КПД фотопреобразования элементов будет более 30%.

Литература

- [1] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Энергия, 1973, 655с.
 [2] Соболева Н.А., Берковский А.Г., Чечик Н.О. и др. Фотоэлектронные приборы /Под ред. Д.В.Зернова. –М.: Наука, 1965, 592с.

Research of efficiency of transformation of optical radiation by the GaAs-photoconverter¹⁾

V.K.Kiselev¹⁾, G.N.Sem'in, A.N.Trufanov

Measuring Systems Research Institute named after Yu.Ye. Sedakov
Nizhni Novgorod 603950, GSP-486, Russia

S.V.Obolensky²⁾

Nizhni Novgorod State University
Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia

The major factors influencing work and efficiency GaAs-photoconverter are considered. It is shown, that the length of a wave of laser radiation should be within the limits of 0.81 – 0.86 microns, the basic influence on efficiency of conversion is connected with thickness and a dope level of working n⁻-layer. Recommendations for design GaAs-photoconverter are given.

¹⁾ Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop. Nizhni Novgorod, 2002

¹⁾ Phone: +7-8312-666130

²⁾ Phone: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru