



УДК 621.383.4

В. П. Афанасьев, Е. Г. Лобанова, Д. Н. Редька, А. С. Гришканич  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Исследование фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида галлия в системах беспроводной передачи энергии

*Проведена оценка возможности использования фотодиодов на основе антимонида галлия для преобразования потока лазерного излучения в электрическую энергию. Исследованы режимы работы фотоэлектрических преобразователей, показаны наиболее оптимальные режимы их использования.*

### Беспроводная передача энергии, фотоэлектрический преобразователь, антимонид галлия, лазерное излучение, открытая атмосферная трасса

В настоящее время активно развивается беспроводная передача энергии на открытых атмосферных трассах для подзарядки различных электронных устройств [1], [2]. Для решения этой задачи используется лазерное излучение, поскольку, благодаря своей высокой направленности и интенсивности, оно способно обеспечить требуемую величину энергетического потока. Для работы в приповерхностном слое атмосферы целесообразно использовать источник излучения ближнего инфракрасного (ИК) диапазона, попадающий в окна прозрачности атмосферы. Также необходимо обеспечить обратное преобразование лазерного излучения в электрическую энергию с минимально возможными потерями.

Основной целью проведенного исследования явилось изучение возможностей создания системы с использованием лазерного излучателя и фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) ИК-диапазона на основе антимонида галлия, позволяющей решить задачу передачи энергии мощным лазерным излучением на открытых атмо-

сферных трассах для удаленного питания различных электронных устройств.

**Система беспроводной передачи энергии.** Принципиальная схема лазерной системы дистанционной подпитки портативных электронных устройств приведена на рис. 1. Излучение мощного лазера через телескопическую систему для регулировки диаметра пучка направляется на ФЭП. Интерфейс – это суммарное обозначение электронных компонентов, позволяющих преобразовать электрическую энергию на выходе с ФЭП в энергию, потребляемую конкретным электронным устройством.

При известных параметрах источника излучения (в данном случае – лазера) задачи повышения коэффициента полезного действия (КПД) системы передачи энергии сводятся в первую очередь к оптимизации приемника как основного элемента схемы [3]. Хотя в настоящее время актуальными являются также вопросы повышения мощности источника лазерного излучения и безопасности системы в целом. Остановимся более

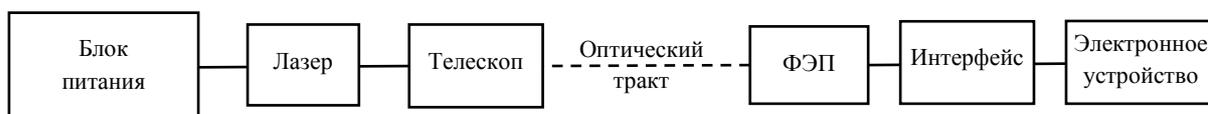


Рис. 1

подробно на требованиях, предъявляемых к источнику и приемнику лазерного излучения.

**Источник излучения.** Лазер как источник высокоэнергетического излучения замечателен тем, что высокая интенсивность и малая угловая расходимость пучка позволяют обеспечить требуемую величину энергетического потока, падающего на приемник малой площади.

Существуют различные типы лазеров, отличающиеся как по рабочим длинам волн, так и по уровню выходной мощности, оптическим характеристикам пучка излучения. Наличие такого разнообразия позволяет выбирать рабочий спектральный диапазон. В данном случае этот выбор обусловлен необходимостью работы в окнах прозрачности атмосферы. На сегодняшний день наиболее широко распространенными типами лазеров в диапазоне длин волн 0.8...2 мкм как с точки зрения производства, так и достижения требуемых параметров являются твердотельные и полупроводниковые лазеры и модули на базе полупроводниковых лазерных диодов. Полупроводниковые лазеры для решения поставленной задачи не подходят, так как способны обеспечить выходную мощность излучения не более 4 Вт и обладают весьма значительной расходимостью излучения. Твердотельные лазеры, напротив, имеют более подходящие технические характеристики для решения данной задачи, однако по сравнению с полупроводниковыми лазерами обладают большими габаритами.

С учетом всех преимуществ и недостатков различных типов лазеров в качестве источника излучения был выбран твердотельный непрерывный лазер на основе алюмоиттриевого граната, легированного ионами неодима (Nd:YAG), работающий на длине волны 1.06 мкм с выходной мощностью до 20 Вт.

**Приемник лазерного излучения.** Выбор ФЭП во многом определяется соотношением спектральных характеристик падающего излучения и материала приемника. Для преобразования излучения ближнего ИК-диапазона, к которому относится представляющая интерес длина волны 1.06 мкм, можно использовать кремниевые ФЭП. Основным их преимуществом являются низкая стоимость и распространенность.

Первые эксперименты проводились с ФЭП на основе кремния. Были сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ) в фотовольтаическом режиме, являющиеся одними из наиболее важных при

выборе ФЭП. Связь напряжения и тока в фотопреобразователе может быть отражена следующим выражением [4]:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] - I_{\phi}, \quad (1)$$

где  $I_s$  – ток насыщения;  $e$  – заряд электрона;  $U$  – фотоЭДС;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $I_{\phi}$  – фототок. Учитывая, что ток короткого замыкания  $I_{к.з} \approx I_{\phi}$ , напряжение холостого хода можно рассчитать по следующей формуле:

$$U_{х.х} = \frac{kT}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_{\phi}}{I_s} \right). \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) видно, что при повышении температуры кристалла и, как следствие, увеличении темнового тока (тока насыщения) коэффициент формы ВАХ  $\xi$  будет уменьшаться. Коэффициент формы показывает насколько реальная ВАХ ФЭП отличается от идеальной, которая представляет собой прямоугольную ступеньку с напряжением холостого хода и током короткого замыкания. Нагрев происходит при увеличении мощности излучения, падающей на приемник ( $P_{пр}$ ). Так, для кремния ВАХ с наилучшим коэффициентом формы при  $P_{пр} = 1.46$  Вт в точке максимальной генерируемой мощности КПД  $\eta$  составило менее 10 %:

$$\eta = 100 \frac{I_{\max} U_{\max}}{P_{пр}} = 100 \frac{\xi I_{к.з} U_{х.х}}{P_{пр}} = 5.5 \ %.$$

Столь малое значение, уменьшающееся с увеличением  $P_{пр}$ , связано с недостаточным теплоотводом. Однако в данной работе наибольший интерес представлял генерируемый фототок, определяемый следующим выражением:

$$I_{\phi} = j_{\phi} S_{п} = e(1-R)\gamma\beta I_{н} S_{п} / (h\nu), \quad (3)$$

где  $j_{\phi}$  – плотность фототока;  $S_{п}$  – площадь  $p$ - $n$ -перехода;  $R$  – коэффициент отражения ( $\approx 0.4$  для  $T = 300$  К и падения излучения по нормали);  $\gamma$  – доля непрорекомбинировавших пар носителей заряда, пришедших к  $p$ - $n$ -переходу (можно принять равной 1);  $\beta$  – квантовый выход ( $\approx 0.4$  при условии, что спектральная чувствительность равна 0.36 А/Вт);  $I_{н}$  – интенсивность излучения;  $\nu$  – частота излучения.

Оценка значений фототока  $I_{\phi}$  по формуле (3) дает величину около 0.3 А. Однако значение  $I_{\phi}$ , полученное экспериментально, почти в 3 раза

меньше. Это объясняется потерями на рекомбинацию в  $p-n$ -переходе, отклонением от нормали плоскости падающего излучения к ФЭП, влиянием температуры и т. д.

При воздействии излучения высокой интенсивности при анализе работы ФЭП необходимо учитывать возможности его разогрева. На рис. 2 представлены температурные зависимости  $I_{к.з}$  и  $U_{х.х}$  исследованного кремниевого ФЭП. Видно, что в то время как  $I_{к.з}$  незначительно (менее 5 %) увеличивается при нагревании элемента на 40 °С,  $U_{х.х}$  уменьшается более чем на 20 %, т. е. при нагревании элемента его КПД падает.

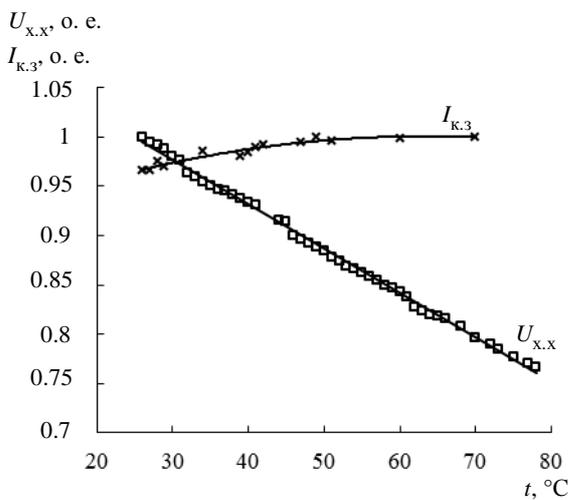


Рис. 2

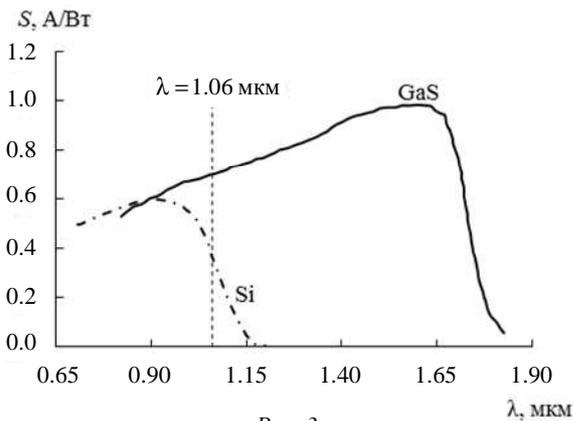


Рис. 3

Такая температурная нестабильность характеристик наравне с исходно низким КПД кремниевых ФЭП, работающих на длине волны 1.06 мкм, вынуждают использовать ФЭП на основе соединений  $A_3B_5$ .

Спектральная чувствительность ФЭП ( $S$ ) позволяет определить значения длин волн излучения, при которых использование данного фотоэлемента наиболее эффективно. На рис. 3 показаны

спектральные характеристики исследованных ФЭП на основе Si и GaSb. Для кремния на длине волны 1.06 мкм  $S = 0.36$  А/Вт, а для антимонида галлия практически в два раза больше – 0.7 А/Вт, что предполагает больший КПД таких элементов.

Спектральная характеристика вещества определяется во многом шириной его запрещенной зоны ( $E_g$ ). Так, для кремния  $E_g = 1.12$  эВ, следовательно, красная граница фотоэффекта, т. е. максимальная длина волны, при которой фотоны поглощаются, приблизительно равна  $\lambda_{max} = 1.24/E_g = 1.11$  мкм. Аналогично для GaSb, у которого  $E_g = 0.72$  эВ,  $\lambda_{max} = 1.72$  мкм. Максимум спектральной характеристики сдвинут в сторону меньших длин волн на 0.2...0.3 мкм от  $\lambda_{max}$ . Соответственно, антимонид галлия не является оптимальным для наиболее эффективного фотопреобразования. Требуется материал с  $\lambda_{max} \approx 1.24$  мкм, т. е. шириной запрещенной зоны  $E_g = 1$  эВ. Такие вещества можно поискать среди тройных и четверных твердых растворов соединений In, Ga, As, Sb (например, InGaAs, GaInAsSb, InAsSbP).

Исходя из изложенного ясно, что использовать ФЭП на основе антимонида галлия в данной системе предпочтительней, чем на основе кремния, что и было подтверждено экспериментально.

**Экспериментальные результаты.** Мощность излучения лазера, а следовательно, мощность, падающая на приемник, прямо пропорциональна изменению тока накачки лазера ( $I_{лаз}$ ). Однако на больших расстояниях  $l$  проявляются эффекты рассеяния лазерного пучка в атмосфере, уменьшается мощность лазерного излучения, изменяется структура пучка. Возникающие потери приводят к искажению линейной зависимости (рис. 4). Следует отметить, что диаметр пучка с увеличением расстояния менялся. Эти недостатки можно устранить путем введения в оптическую схему телескопической системы на выходе излучения из лазера, формирующей узконаправленный пучок излучения.

Были измерены ВАХ ФЭП на основе антимонида галлия (рис. 5) при разных мощностях потока излучения. Более стабильные результаты измерений могут быть связаны с улучшенной по сравнению с кремниевым ФЭП конструкцией теплоотвода. Видно, что увеличение фототока линейно зависит от увеличения мощности падающего излучения.

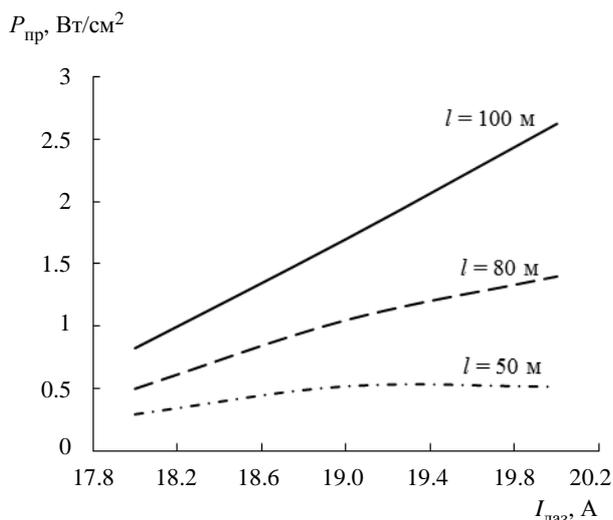


Рис. 4

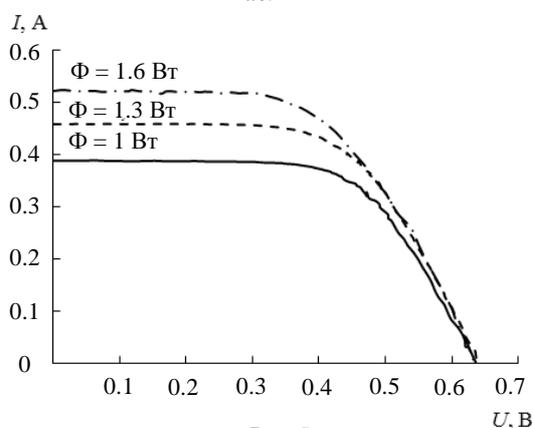


Рис. 5

На рис. 6 приведены графики зависимости КПД ФЭП на основе Si и GaSb от мощности излучения, падающей на приемник. Видно, что при одинаковых площадях приемника КПД преобразования ФЭП на основе антимонида галлия в несколько раз выше. Это во многом связано не только с большей спектральной чувствительностью, но и с лучшим теплоотводом.

Проведенные исследования также показали, что параметры ФЭП в целом очень сильно зависят от внутреннего сопротивления его элементов. При различных их значениях происходит перераспределение токов в схеме с нагрузочным сопротивлением, поэтому важно подобрать элементы с близкими внутренними сопротивлениями для улучшения параметров всего ФЭП.

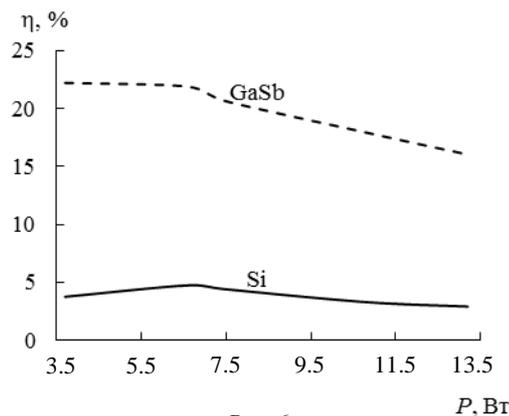


Рис. 6

Также был проведен эксперимент с двумя приемниками одинаковой площади в равных условиях, но с различными теплоотводящими радиаторами. Один приемник состоял из чувствительного элемента, napаянного на медный теплоотвод толщиной 3 мм, механически соединенного с более крупным радиатором, в конструкции второго приемника в месте контактов теплопроводящих поверхностей была нанесена специальная термопаста. Сопротивление нагрузки в обоих случаях составляло 0.5 Ом. Улучшенный теплоотвод позволяет при той же входной мощности получить большие значения КПД, что представляет особую важность при работе с лазерным излучением высокого уровня мощности.

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие рекомендации к разработке приемников мощного лазерного излучения для использования в системах беспроводной передачи энергии:

- необходимо разработать телескопическую систему, позволяющую согласовывать на различных расстояниях геометрические размеры поперечного сечения пучка лазерного излучения и приемной площадки фотоэлектрического преобразователя;
- согласовать электрофизические параметры отдельных элементов приемника, в первую очередь их темновые сопротивления;
- обеспечить максимально возможный теплоотвод во избежание деградации материала под действием высоких мощностей излучения в результате нагрева, а также для поддержания рабочего температурного режима приемника.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bellows C. T. Minimizing Losses in a Space Laser Power Beaming System. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2010. 114 p.
2. Nugent T. J., Kare J. T. Laser Power for UAVs. Kent: LaserMotive, 2010. 9 p.
3. Andreev V., Khvostikov V., Kalinovsky V. High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power

beaming // Proc. of 3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka: IEEE, 2003. Vol. 1. P. 761–764.

4. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 168 с.

V. P. Afanasiev, E. G. Lobanova, D. N. Redka, A. S. Grishkanich  
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## RESEARCH OF PHOTO-ELECTRIC CONVERTERS IN SYSTEMS OF WIRELESS TRANSMISSION OF ENERGY BASED ON GALLIUM ANTIMONID

*In this paper assessment of the possibility of using photodiodes based on gallium antimonide for transformation of a stream of laser radiation to electric energy is carried out. Investigation of modes of operation photoelectric converters is realized, the most optimum modes of their use are shown.*

**Wireless transmission of energy, photo-electric converter, gallium antimonite, laser radiation, open atmospheric trace**

УДК 535.651

Д. К. Кострин, А. А. Ухов, В. А. Герасимов,  
С. А. Марцынюков, Л. М. Селиванов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Спектрометрический метод контроля характеристик светоизлучающих диодов

*Рассмотрены основные колориметрические характеристики светоизлучающих диодов и методы их расчета по спектрам излучения. Показана возможность контроля параметров светодиодов и светильников на их основе с помощью оптического спектрометра.*

**Светоизлучающий диод, оптический спектрометр, колориметрические характеристики**

Светоизлучающие диоды (СИД) за счет долговечности, надежности и низкого энергопотребления в настоящее время практически повсеместно используются для замены использовавшихся ранее источников оптического излучения. Области применения СИД являются не только устройства, обеспечивающие свет одного цвета, такие как светофоры, аварийные огни и сигнальные лампы на всех видах транспорта, но и различные осветительные приборы, применяемые в жилых и производственных помещениях, а также для освещения тротуаров и автомобильных дорог [1].

Расширение областей применения СИД повышает необходимость точного измерения их параметров. Характеристики СИД разных производителей значительно различаются, также возможен разброс параметров СИД даже в рамках одной партии. Важным является измерение их световых и цветовых характеристик, а также возможность визуального отображения спектров излучения исследуемых СИД. Существует очевидная

необходимость в контроле параметров СИД как на этапе их производства, так и при их использовании в серийно выпускаемых приборах [2].

При оценке СИД следует в первую очередь анализировать следующие характеристики:

- фотометрические;
- радиометрические;
- колориметрические;
- гониометрические;
- эксплуатационные.

Остановимся подробнее на колориметрических характеристиках СИД, определяющих восприятие цвета излучения человеческим глазом. Цветовое восприятие человека весьма сложно, поскольку оно зависит не только от физических свойств света, но также и от окружающих объектов, свойств излучателя и психологического состояния наблюдателя. Колориметрические параметры СИД обычно выражены цветовыми координатами и доминирующей длиной волны, для белых СИД также используется значение коррелированной цветовой температуры.