

05:06;12

# Моделирование и исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs и GaSb

© Л.С. Лунин, А.С. Пащенко

Южный научный центр РАН,  
344006 Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: lunin\_ls@mail.ru

(Поступило в Редакцию 29 сентября 2010 г.)

Представлены результаты моделирования световых вольт-амперных и ватт-вольтовых характеристик для варьируемых условий (последовательного сопротивления, температуры, диодного параметра  $A$ ) и исследования абсолютной спектральной чувствительности фотоэлектрических преобразователей GaAs, GaSb. Показано, что на величину напряжения холостого хода наибольшее влияние оказывают величина диодного параметра  $A$  и температура  $T$ , а на КПД фотоэлектрического преобразователя — последовательное сопротивление и диодный параметр. Показана перспективность использования фотоэлектрических преобразователей на основе GaSb и GaAs в каскадных солнечных элементах для преобразования концентрированного солнечного излучения.

## Введение

В связи с растущими объемами выпуска и коммерциализации фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) возникает необходимость точного определения их параметров и характеристик. При исследовании ФЭП стадию прямого измерения световой вольт-амперной характеристики (ВАХ) и ватт-вольтовой характеристики (ВВХ) можно заменить процессом компьютерного моделирования, что снимает необходимость иметь в наличии дорогостоящие имитаторы солнечного излучения. Теоретические основы работы ФЭП, а также математические выражения, используемые для построения модели, хорошо описаны в [1–2]. В работах [4,5] были представлены результаты моделирования ВАХ кремниевых ФЭП, модулей и солнечных батарей на их основе, а также в работах [6,7] описан пример использования математического пакета Matlab.

В настоящей работе представлены результаты моделирования световых ВАХ и ВВХ и исследования абсолютной спектральной чувствительности ФЭП на основе GaAs и GaSb.

## 1. Экспериментальная часть

Для исследования были выбраны ФЭП GaAs, GaSb, полученные методом жидкофазной эпитаксии.

При моделировании световой ВАХ ФЭП необходимо знать один из базовых параметров:  $I_{sc}$  — ( $sc$  — short circuit) ток короткого замыкания или  $U_{oc}$  — ( $oc$  — open circuit) напряжение холостого хода. В данной модели известной величиной являлся ток короткого замыкания  $I_{sc}$ . Он определялся экспериментальным путем с помощью комплекса для измерения абсолютной спектральной чувствительности ФЭП в диапазоне длин волн от 350 до 1840 nm. В случае каскадных ФЭП комплекс

позволяет определять ток короткого замыкания для каждого  $p-n$ -перехода.

Измерение спектральной чувствительности ФЭП GaAs и GaSb производилось по схеме, показанной на рис. 1. Монохроматический свет последовательно фокусировался на контрольный ФЭП и исследуемый. Определение значений фоточувствительности в абсолютных величинах производится путем сравнения фототоков исследуемого ФЭП и контрольного при попадании на них монохроматического света. Сигналы с фотоприемников фиксировались блоком управления, затем программа управления производила расчет величины абсолютной спектральной чувствительности и тока короткого замыкания  $I_{sc}$ . При измерениях использовались два контрольных фотоприемника: на основе Si — для спектрального диапазона 350–1100 nm; на основе GaSb — на спектральный диапазон 800–1840 nm.

Таким образом, на первой стадии исследования экспериментально определялись абсолютная спектральная чувствительность и ток короткого замыкания структуры, после чего начиналось моделирование кривых ВАХ и ВВХ в разработанном нами программном интерфейсе.

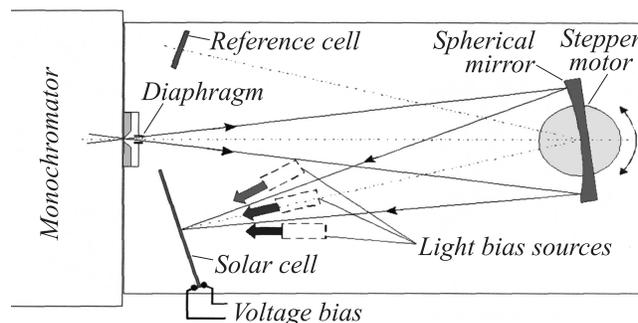


Рис. 1. Оптическая схема измерения абсолютной спектральной чувствительности.

Параметры ФЭП, используемые при моделировании ВАХ и ВВХ

Тип ФЭП	$S, \text{cm}^2$	$R_s, \Omega \cdot \text{cm}^2$	$T_{nc}, ^\circ\text{C}$	$T_{sc}, ^\circ\text{C}$	$A$	$U_{oc}, \text{V}$	Условия освещенности
GaAs	0.16	1	25	30	2	0.9	AM0
GaSb	0.2025	1	25	30	2	0.5	AM0

Примечание:  $S$  — площадь ФЭП,  $R_s$  (series resistance) — последовательное сопротивление,  $T_{nc}$  ( $nc$  — normal conditions) — температура нормальных условий,  $T_{sc}$  ( $sc$  — solar cell) — температура фотоэлектрического преобразователя,  $A$  — диодный параметр,  $U_{oc}$  ( $oc$  — open circuit) — напряжение холостого хода.

## 2. Результаты и их обсуждение

### 2.1. Спектральная чувствительность

Экспериментальные зависимости абсолютной спектральной чувствительности исследуемых образцов показаны на рис. 2.

Анализ спектральных зависимостей показывает больший внешний квантовый выход EQE (external quantum efficiency) в диапазоне длин волн 550–850 нм у фотоэлектрического преобразователя на основе GaAs (EQE  $\approx$  0.8) по сравнению с образцом из GaSb, что

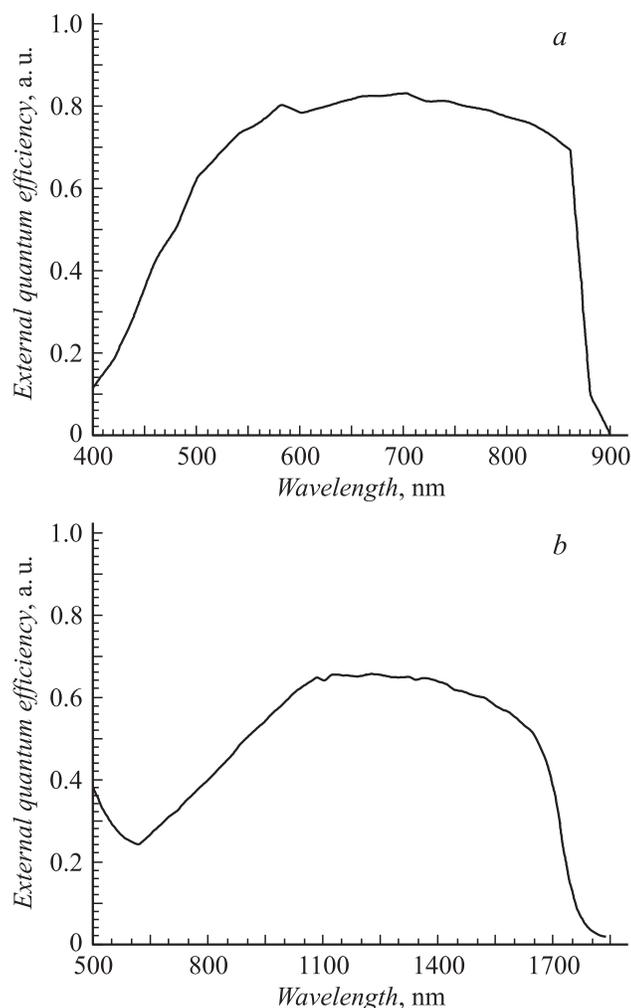


Рис. 2. Спектры внешней квантовой чувствительности исследуемых ФЭП: GaAs (a), GaSb (b).

свидетельствует о низкой эффективности преобразования солнечного излучения ФЭП на основе GaSb в указанном спектральном диапазоне. Как видно, эффективность преобразования в длинноволновом диапазоне для GaAs ограничена энергией фотонов  $h\nu$ , соответствующей ширине запрещенной зоны материала ( $E_{g-(energy\ gap)} = 1.42 \text{ eV}$ , при  $T = 300 \text{ K}$ ). Эффективность солнечного элемента на основе GaSb в длинноволновом диапазоне, так же как и в случае с GaAs, ограничена энергией фотонов  $h\nu = E_g = 0.726 \text{ eV}$  при  $T = 300 \text{ K}$ . Однако в интервале длин волн 900–1600 нм у ФЭП на основе GaSb EQE выше 0.5, в то время как ФЭП на основе GaAs прозрачен для излучения в этом спектральном диапазоне.

### 2.2. Вольт-амперные и ватт-вольтовые характеристики

На основе рис. 3 показаны световые ВАХ и ВВХ ФЭП на основе GaAs (a) и GaSb (b).

Из практики известно, что особое влияние на характеристики фотоэлектрических преобразователей имеют последовательное сопротивление (series resistance)  $R_s$ , температура  $T$ , диодный параметр  $A$  [1,2,8,9].

**2.2.1. Влияние последовательного сопротивления.** Для наиболее полного соответствия результатов моделирования ВАХ и ВВХ с данными, полученными из экспериментов, было учтено влияние последовательного сопротивления на ВАХ исследуемых образцов. Воздействие шунтирующего сопротивления на ВАХ ФЭП при моделировании не учитывалось, потому как оказывает незначительное влияние [3,8,9].

Известно, что последовательное сопротивление определяется объемным удельным сопротивлением слоев, входящих в структуру, и контактным сопротивлением. Выражения, описывающие влияние  $R_{s-(series)}$  на ВАХ, подробно рассмотрены в работах [1,3].

Исследование влияния последовательного сопротивления  $R_s$  на ВАХ и ВВХ (рис. 4) проводилось путем варьирования величины сопротивления  $R_s$  в пределах от 1 до  $10 \Omega \cdot \text{cm}^2$  для ФЭП на основе GaAs и от 1 до  $20 \Omega \cdot \text{cm}^2$  в случае с GaSb. Параметры ФЭП, используемые при моделировании, указаны в таблице.

В случае ФЭП из арсенида галлия при увеличении последовательного сопротивления КПД уменьшался с 13.612 до 5.657%, а для ФЭП на основе антимонида галлия с 7.317 до 0.971%. Отсюда можно заключить,

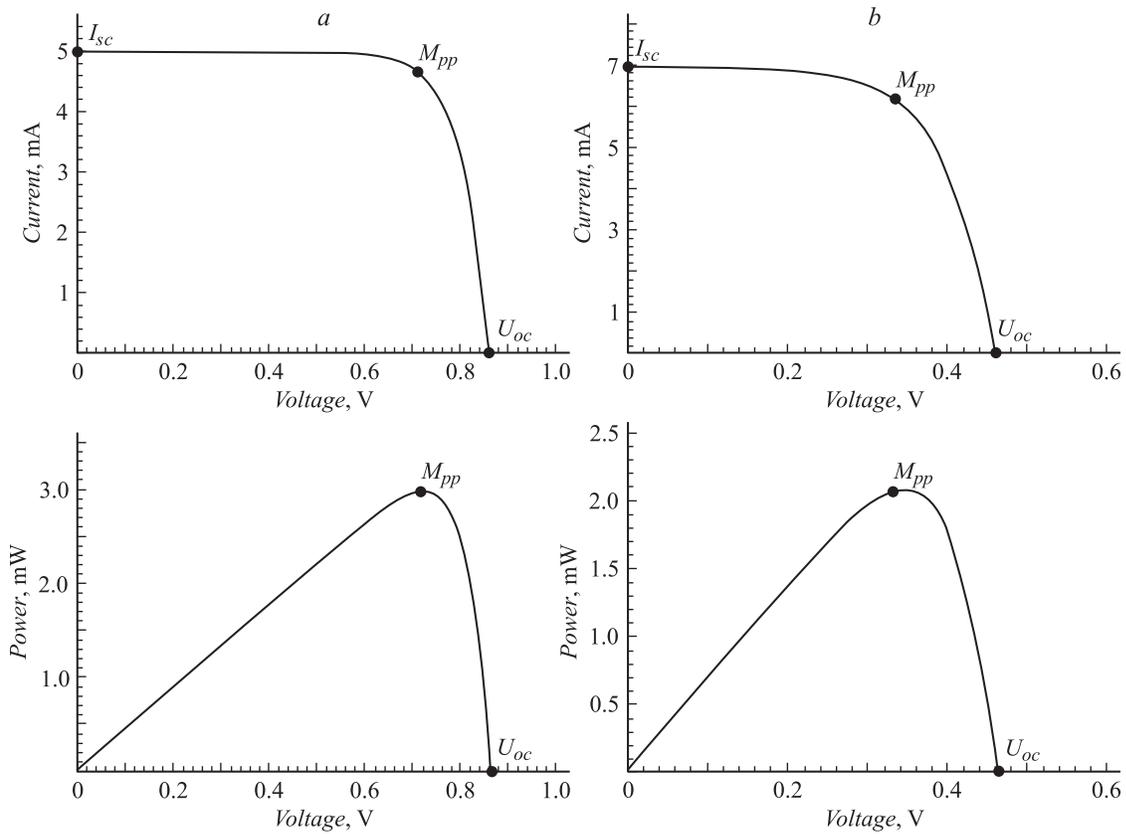


Рис. 3. Графики световых ВАХ и ВВХ GaAs (a) и GaSb (b).

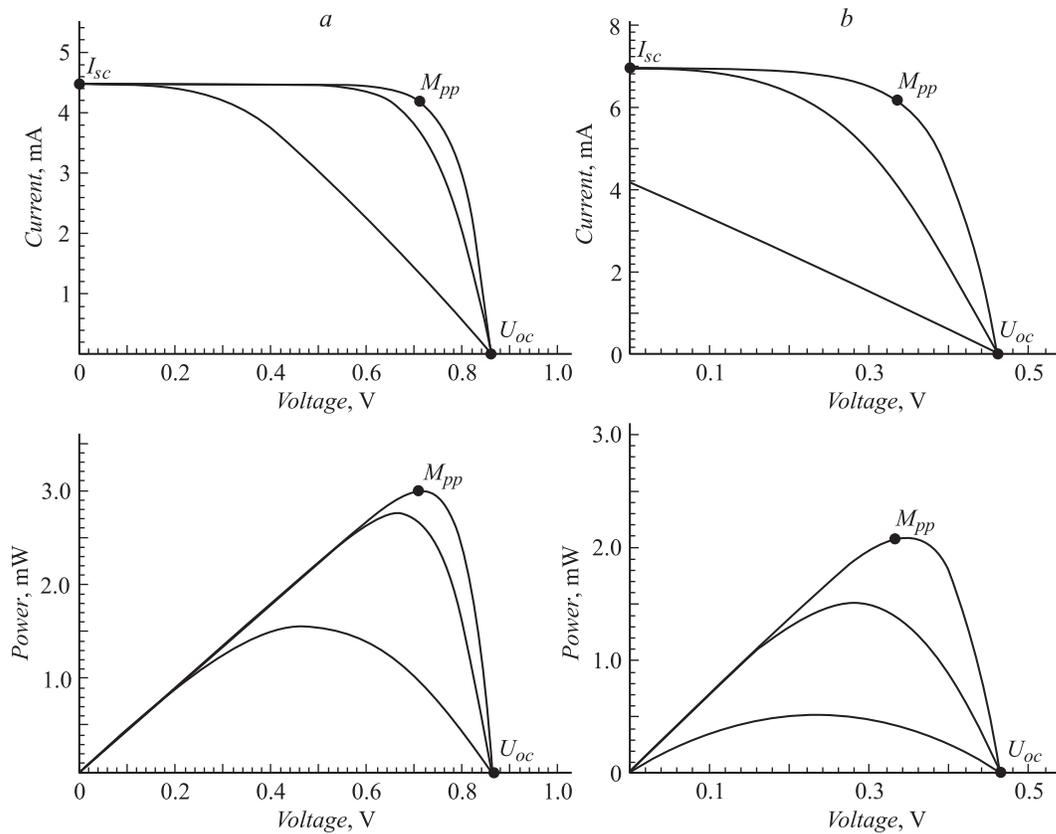


Рис. 4. Влияние последовательного сопротивления на ВАХ и ВВХ ФЭП на основе GaAs (a) и GaSb (b).

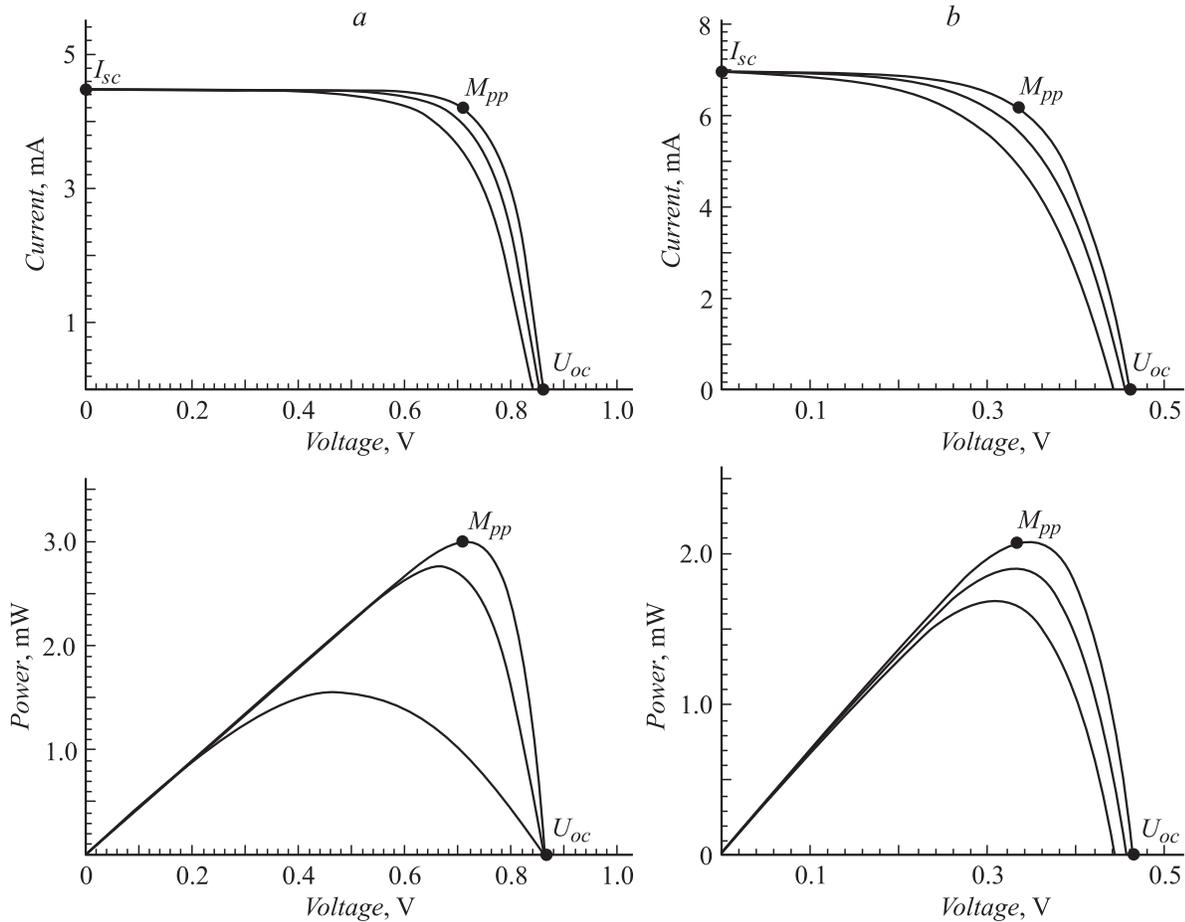


Рис. 5. Влияние температуры на ВАХ и ВВХ ФЭП на основе GaAs (a) и GaSb (b).

что чем меньше величина последовательного сопротивления, тем больше мощность, вырабатываемая СЭ, а следовательно, и КПД. На графиках (рис. 4) это хорошо отображается видом ВАХ и ВВХ, для которых кривая ВАХ, наиболее приближенная к прямому углу (имеет больший фактор „заполнения“), соответствует наибольшему значению КПД.

**2.2.2. Влияние температуры.** Моделирование влияния температуры на параметры ВАХ и ВВХ ФЭП проводилось варьированием величины температуры солнечного элемента в диапазоне от 30 до 200°C. Параметры, используемые при расчетах, не отличаются от используемых в предыдущем опыте.

Анализ полученных кривых ВАХ показывает, что с увеличением температуры уменьшается величина фактора „заполнения“ ВАХ, но при этом уменьшается и величина напряжения холостого хода  $U_{oc}$ . Ток короткого замыкания практически не меняет своего значения (рис. 5).

Очевидно, что уменьшение величины  $U_{oc}$  при увеличении температуры приводит к снижению КПД фотоэлектрических преобразователей, но в меньшей степени, как это наблюдалось в случае с последовательным сопротивлением. Так, в случае с ФЭП на основе GaAs

величина КПД менялась в пределах 13.612–11.891%, а для GaSb в пределах 7.317–5.857%.

**2.2.3. Влияние диодного параметра A.** Далее рассмотрим влияние механизма переноса носителей заряда на вид ВАХ. Параметр  $A$  в уравнении ВАХ (1), (2) учитывает влияние этого процесса в фотоэлектрических преобразователях при математическом моделировании

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{qU}{AkT} \right) - 1 \right), \quad (1)$$

$$U_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left( \frac{I_{pn} - I_{sc}}{I_0} + 1 \right), \quad (2)$$

где  $I_{sc}$  — ток короткого замыкания,  $U_{oc}$  — напряжение холостого хода,  $I_{ph}$  — фототок,  $I_0$  — ток насыщения,  $A$  — диодный параметр,  $k$  — постоянная Больцмана,  $q$  — заряд электрона,  $T$  — температура.

Из [1–3] известно, что при значении параметра  $A = 1$  диодные уравнения (1), (2) приобретают вид уравнения ВАХ для идеального диода

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \exp \left( \exp \left( \frac{qU}{kT} \right) - 1 \right), \quad (3)$$

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{sc}}{I_0} + 1 \right). \quad (4)$$

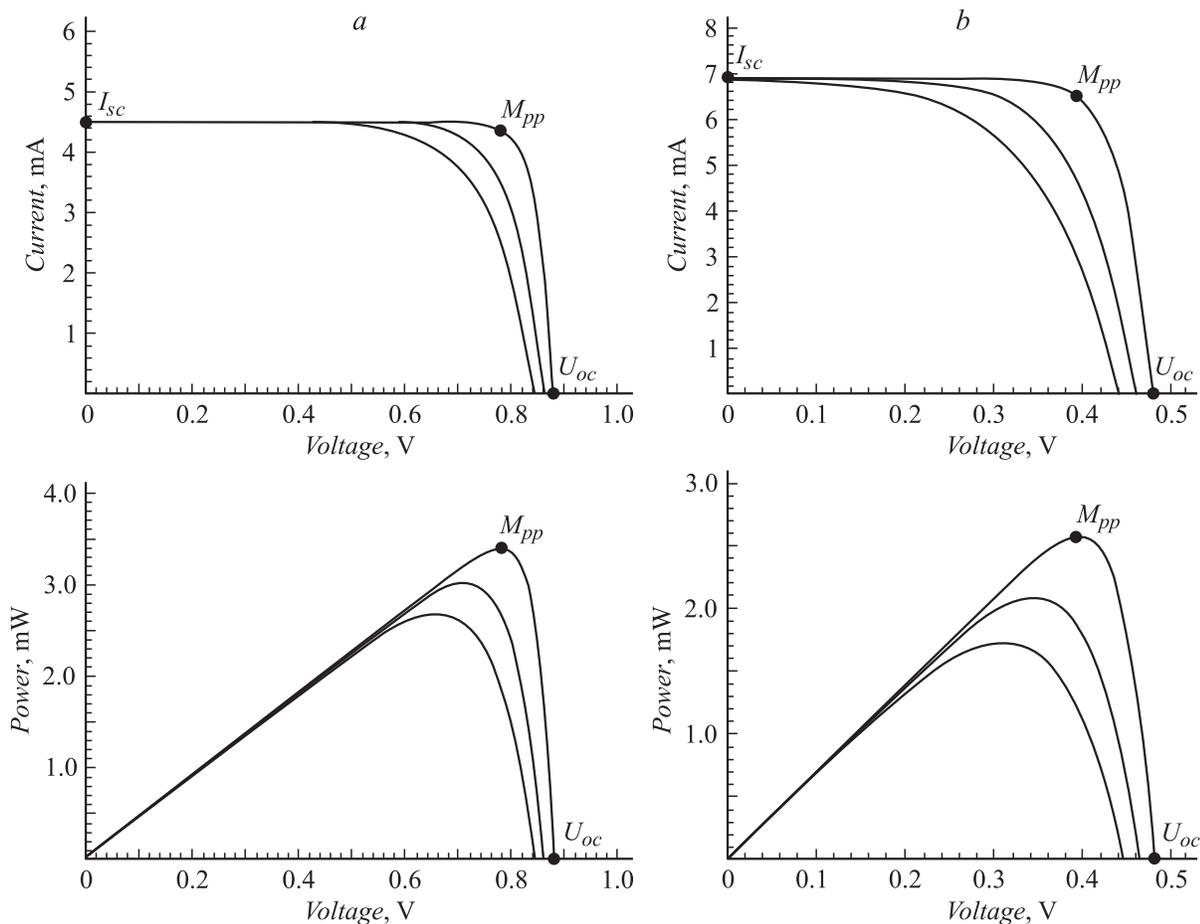


Рис. 6. Влияние диодного параметра  $A$  на ВАХ и ВВХ ФЭП на основе GaAs (a) и GaSb (b).

При значении параметра  $A$ , близком к 2, в  $p-n$ -переходе преобладает рекомбинационный механизм переноса носителей заряда, при  $A = 1$  преобладает диффузионный механизм. В нашем случае величина диодного параметра варьировала в пределах от 1 до 3 только лишь для качественного отображения влияния параметра  $A$  на ВАХ и ВВХ ФЭП. Расчет реальной величины диодного параметра  $A$  исследуемых ФЭП в настоящей работе не проводился.

Начальные данные, использованные в расчетах, не отличаются от описанных ранее для влияния последовательного сопротивления и температуры. На рис. 6 показаны ВАХ и ВВХ ФЭП на основе GaAs и GaSb при различных значениях параметра  $A$ . Наиболее пологая кривая ВАХ соответствует значению диодного параметра  $A = 3$ , кривая ВАХ, содержащая точку MPP (Maximum power point) на изгибе, соответствует  $A = 1$ . При этом для значения  $A = 1$  КПД GaAs фотопреобразователя равнялся 15.5%, а GaSb — 9%. При  $A = 3$  КПД составлял 12 и 6% соответственно для GaAs и GaSb ФЭП. Необходимо отметить заметное уменьшение величины напряжения холостого хода при увеличении параметра  $A$ , что безусловно отрицательно сказывается на величине КПД фотопреобразователей.

## Заключение

Проведенный анализ результатов моделирования ВАХ и исследования абсолютной спектральной чувствительности ФЭП на основе GaAs и GaSb показывает, что наибольшее влияние на величину КПД и вид ВАХ исследуемых фотопреобразователей оказывают последовательное сопротивление  $R_s$  и параметр  $A$ , учитывающий влияние механизма переноса носителей заряда. Этот факт необходимо учитывать при практическом изготовлении фотоэлектрических преобразователей для достижения высоких КПД, получая структуры с минимальным значением величины последовательного сопротивления.

Другим фактором, влияющим на форму ВАХ и лимитирующим величину КПД, является температура, так как при ее увеличении значительно снижается величина напряжения холостого хода  $U_{oc}$ . Особенно это влияние необходимо учитывать при изготовлении ФЭП для преобразования концентрированного солнечного излучения.

Анализ спектральных зависимостей фотопреобразователей на основе GaAs и GaSb позволяет сделать вывод о перспективности использования их в каскадных солнечных элементах, где GaSb должен будет выступать в роли „активной“ подложки, содержащей  $p-n$ -переход,

эффективно поглощающей ИК диапазон солнечного излучения, а GaAs в качестве фронтального СЭ для преобразования видимого спектра солнечного излучения.

## Список литературы

- [1] *Васильев А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фото-преобразователи. 1971. М.: Советское радио, 246 с.
- [2] *Fahrenbruch A.L., Bube R.H.* Fundamentals of Solar Cells. Photovoltaic Solar Energy Conversion. N.Y., 1983.
- [3] *Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука 1989. 310 с.
- [4] *King D.-L., Dudley J.K., Boyson W.E.* PVSIM: A Simulation Program For Photovoltaic Cells, Modules, and Arrays. 25 IEEE PVSC, Washington, DC, May 13–17, 1996.
- [5] *Nema R.K., Nema S., Agnihotri G.* // International Journ of Recent Trends in Engineering. 2009. Vol. 1.1. N 3.
- [6] *Francisco M. Gonzalez-Longatt* Model of Photovoltaic Module in Matlab™, 2DO Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (II CIBELEC 2005).
- [7] *Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, Yi-Jie Su* „Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/SIMULINK“, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008, October 22–24, 2008, San Francisco, USA.
- [8] *Andreas Wagner* „Photovoltaik Engineering“, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [9] *Hering E., Martin R.* (Hrsg.) „Photonik“, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.