

Основные фотоэлектрические характеристики трехпереходных солнечных элементов InGaP/InGaAs/Ge в широком диапазоне температур ($-197 \leq T \leq +85^\circ\text{C}$)

© В.М. Андреев, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Д. Румянцев, А.В. Чекалин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: chekalin@mail.ioffe.ru

(Получена 28 марта 2016 г. Принята к печати 4 апреля 2016 г.)

Целью настоящей работы является исследование основных фотоэлектрических характеристик трехкаскадных фотоэлектрических преобразователей InGaP/InGaAs/Ge в широком диапазоне температур ($-197 \leq T \leq +85^\circ\text{C}$). Благодаря анализу спектров fotocувствительности и световых вольт-амперных характеристик определены зависимости от температуры таких величин, как напряжение холостого хода (V_{oc}), фактор заполнения вольт-амперной характеристики (FF) и эффективность фотоэлектрического преобразования солнечного излучения. Исследования проводились при интенсивностях засветки, соответствующих работе при концентрированном облучении. Пониженные температуры способствовали отбору образцов с минимальными „паразитными“ потенциальными барьерами. Оценено влияние процессов переноса возбуждения из каскада в каскад с помощью вторичного люминесцентного излучения. Наивысшая эффективность фотоэлектрического преобразования 52% была измерена при кратности концентрирования 100 „солнц“ и температуре -160°C .

1. Введение

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе полупроводниковых материалов $A^{III}B^V$ широко используются для преобразования солнечной энергии в электрическую на космических аппаратах и в наземных установках с концентраторами излучения [1–4], а также в устройствах передачи энергии по лазерному лучу [5,6]. Широта областей применения обуславливает разнообразие условий эксплуатации ФЭП в отношении уровней засветки и рабочих температур. Если говорить о солнечных энергосистемах нового поколения, то они строятся на основе высокоэффективных наногетероструктурных ФЭП каскадного типа [4,7]. В наземных условиях при засветке солнечным излучением со спектром AM 1.5 при кратностях концентрирования порядка 500–1000 „солнц“ ФЭП с тремя $p-n$ -переходами в материалах InGaP/InGaAs/Ge имеют эффективность фотоэлектрического преобразования $\sim 40\%$ [4,8]. В условиях космоса высокоэффективные ФЭП могут работать при прямой или слабо концентрированной солнечной засветке и при весьма низких температурах [9].

Как правило, различия в структурах для трехкаскадных ФЭП, разработанных специально для наземных или космических применений, не являются принципиальными. Успешное совершенствование структуры в одном типе ФЭП может помочь найти эффективные методы по оптимизации схожих структур для других применений. Для реализации такой возможности важным является изучение влияния различных факторов, таких как изменение температуры и уровня освещенности, на рабочие параметры приборов. Полученные результаты исследований могут быть применены не только к солнечным преобразователям каскадного типа на основе

соединений $A^{III}B^V$, но и к преобразователям лазерного излучения с одним $p-n$ -переходом.

Целью настоящей работы было исследование основных фотоэлектрических характеристик трехкаскадных ФЭП InGaP/InGaAs/Ge в широком диапазоне температур ($-197 \leq T \leq +85^\circ\text{C}$). К числу основных характеристик мы относим параметры спектров fotocувствительности, световых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и, в частности, зависимости от температуры таких величин, как напряжение холостого хода (V_{oc}), фактор заполнения ВАХ (FF) и эффективность фотоэлектрического преобразования солнечного излучения. Исследования проводились при вариациях интенсивности засветки ФЭП, соответствующих в том числе работе при концентрированном солнечном облучении. Предполагалось, что пониженные температуры при исследованиях будут способствовать выявлению встроенных „паразитных“ потенциальных барьеров в гетероструктурах ФЭП каскадного типа, активизации процессов переноса возбуждения из каскада в каскад с помощью вторичного люминесцентного излучения и, наконец, просто увеличению КПД за счет увеличения генерируемого напряжения, если какие-либо возможные негативные факторы не пересиливают эту тенденцию.

2. Образцы и методики исследований

Исследуемые каскадные ФЭП включали в себя три фотоактивные области с $p-n$ -переходами, расположенными в материалах InGaP, InGaAs и Ge. Эти области соединены последовательно с помощью двух туннельных $p-n$ -переходов в многослойной гетероструктуре, выращенной методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений на германиевой подложке [10].

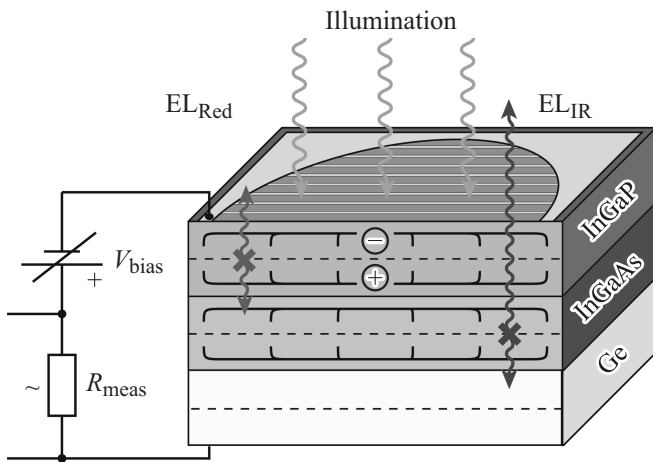


Рис. 1. Упрощенная структурная схема трехкаскадного ФЭП InGaP/InGaAs/Ge. Показана схема внешней цепи (V_{bias} — смещение, R_{meas} — измерительное сопротивление) для измерения спектров fotocувствительности, а также возможные процессы взаимодействия каскадов за счет переноса электролюминесцентного (EL) излучения, возникающего в многослойной гетероструктуре на основе прямозонных полупроводниковых материалов. В частности, это перенос возбуждения из верхнего каскада в средний за счет „красной“ люминесценции верхнего каскада (EL_{Red}) и перенос из среднего в нижний за счет инфракрасной люминесценции среднего каскада (EL_{IR}).

Образцы имели полосковые контакты на освещаемой поверхности и сплошной контакт на тыльной поверхности. Площадь квадратных ФЭП составляла $0.04–0.09 \text{ см}^2$ в зависимости от типа образцов. Весьма упрощенная структура ФЭП приведена на рис. 1. Рисунок также показывает возможные процессы взаимодействия каскадов за счет переноса люминесцентного излучения, возникающего в сложной многослойной гетероструктуре на основе прямозонных полупроводниковых материалов при достаточно глубоком охлаждении и значительной плотности фототока (пояснения см. далее). Поставленные задачи по записи спектров fotocувствительности и оценке эффективности фотоэлектрического преобразования в лабораторных условиях потребовали решения целого ряда проблем методологического и инструментального характера. Во-первых, необходимо было разработать такую методику записи спектров fotocувствительности, при которой вторичное люминесцентное излучение вносило бы минимальную погрешность в расчетное определение плотности фототока при интенсивности облучения в одну солнечную постоянную при стандартном спектральном распределении AM 1.5. Во-вторых, необходимо было скорректировать спектр излучения и интегральную интенсивность лабораторного имитатора солнечного излучения таким образом, чтобы возникающее при изменении температуры движение спектров fotocувствительности ФЭП вдоль оси длин волн позволяло адекватно оценить изменение интегрального фототока и КПД. Используемый имитатор был построен на базе импульсной ксеноновой лампы со специально

разработанным интерференционным фильтром [11]. Последнее было существенным, так как сдвиг границ чувствительности среднего и нижнего каскадов приходился на спектральную область излучения ксеноновой лампы $\lambda = 850–950 \text{ нм}$, исходно характеризующуюся достаточно интенсивными пиками [12].

При температурных измерениях использовался стеклянный сосуд Дьюара с контролируемой компьютером системой охлаждения и нагрева. При измерениях вольт-амперных характеристик условия освещенности, соответствующие условиям AM 1.5d LOAD, контролировались с помощью калиброванного фотоэлемента, находящегося при комнатной температуре. Оптическое пропускание стенок сосуда учитывалось при получении окончательных результатов [13].

Для спектральных измерений в широком диапазоне температур использовалась галогеновая лампа в качестве источника излучения, механический модулятор, монохроматор с дифракционными решетками и система записи спектров с синхронным детектированием сигналов. Для записи спектра fotocувствительности каждого из каскадов в трехпереходном ФЭП $p-n$ -переходы в двух других каскадах должны „закорачиваться“ путем непрерывной подсветки от лазерных источников для обеспечения протекания во внешней цепи модулированного тока от исследуемого каскада [14,15]. Три лазера с длинами волн излучения $\lambda = 405, 808 \text{ и } 1300 \text{ нм}$ использовались попарно при записи спектров внешней квантовой эффективности (EQE) верхнего, среднего и нижнего каскадов. Внешняя квантовая эффективность при каждом значении длины волны излучения от монохроматора рассчитывалась как отношение количества электронов, прошедших через внешнюю цепь, к количеству фотонов, попавших на светочувствительную поверхность ФЭП. При этом размеры пятна засветки поддерживались меньшими, чем размеры светочувствительной поверхности как исследуемого образца ФЭП, так и калиброванного фотоэлемента, с которым сравнивались регистрируемые значения фототока.

На начальном этапе исследований был произведен отбор образцов ФЭП по минимальным значениям встроенных „паразитных“ потенциальных барьеров. Для этого измерялись световые ВАХ для имеющихся в наличии ФЭП разных типов (тип А, В и С) при кратности концентрирования солнечного излучения 300 „солнц“ и при двух температурах: $T = +25 \text{ и } -164^\circ\text{C}$. А — структура, согласованная по постоянной решетки, площадь 0.0398 см^2 , В — структура, согласованная по постоянной решетки, площадь 0.0415 см^2 , С — метаморфная структура, площадь 0.0916 см^2 . Сравнение ВАХ проведено на рис. 2. Можно заметить схожесть зависимостей при достаточно высокой температуре ($T = +25^\circ\text{C}$) и заметное различие при низкой температуре (-164°C). Для ФЭП типов А и В наблюдается появление изгиба вольт-амперной характеристики в области, расположенной вблизи значения напряжения холостого хода. Причиной такого поведения обычно является наличие встроенных

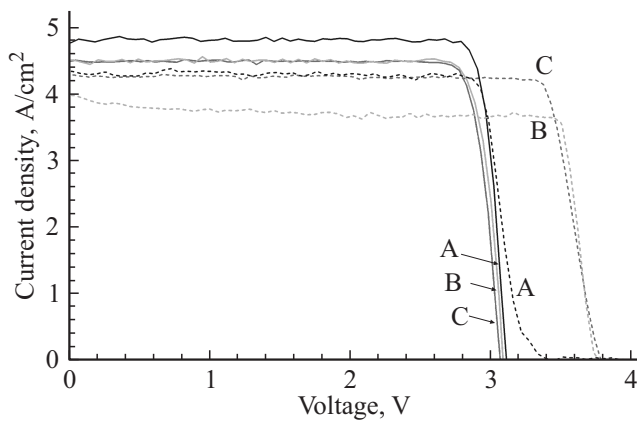


Рис. 2. Сравнение световых ВАХ для ФЭП типов А, В и С при кратности концентрирования солнечного излучения 300 „солнц“ и двух температурах, $T = +25^\circ\text{C}$ (сплошная линия) и -164°C (пунктирная).

потенциальных барьеров для основных носителей заряда на одной из границ гетеропереходов, как это было показано в [9]. Активизация „паразитных“ потенциальных барьеров при понижении температуры образцов приводит к тому, что напряжение в точке максимальной выходной мощности не увеличивается или увеличивается мало по сравнению с увеличением напряжения холостого хода. Наличие этого негативного фактора препятствует получению высокой эффективности фотоэлектрического преобразования при низких температурах. Из рис. 2 видно, что искривление падающего участка вольт-амперной характеристики практически отсутствует для ФЭП типа С (его площадь составляла 0.09 см^2) при выбранной кратности концентрирования излучения. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на изучение зависимостей основных фотоэлектрических параметров именно этого типа ФЭП.

3. Спектры фоточувствительности

На рис. 3 приведены спектры фоточувствительности ФЭП типа С при трех температурах: $T = +25, -100, -197^\circ\text{C}$. Как уже отмечалось, для записи спектров каждого из каскадов $p-n$ -переходы двух оставшихся каскадов „закорачивались“ путем непрерывной подсветки от лазерных источников, положения линий генерации которых отмечены на рис. 3 вертикальными стрелками. Вид спектров при пониженных температурах в целом соответствует обычно наблюдаемому при комнатной и повышенных температурах [14,15]. Изрезанный характер „полочек“ на спектральных характеристиках среднего (InGaAs) и нижнего (Ge) каскадов соответствует формированию интерференционной картины при прохождении света до соответствующих $p-n$ -переходов в сложной многослойной гетероструктуре. Спектральные сдвиги длинноволновых и коротковолновых краев чувствительности каскадов соответствуют температурным

изменениям ширины запрещенной зоны материалов фотоактивных областей в каждом из каскадов. В качестве положительного фактора необходимо отметить лишь незначительное изменение внешней квантовой эффективности в максимумах при понижении температуры. В связи с этим интегральный фототок при охлаждении ФЭП также должен меняться незначительно.

Существенным фактором, влияющим на вид спектров при пониженных температурах, является возникновение „пьедестала“ фоточувствительности среднего каскада в области чувствительности верхнего каскада (это область $\lambda \leq 600\text{ нм}$) и такого же „пьедестала“, но уже для нижнего каскада, присутствующего в области чувствительности среднего ($600 \leq \lambda \leq 850\text{ нм}$). Исследования показали, что эти явления связаны с переносом оптического возбуждения из более широкозонных в узкозонные каскады за счет вторичного электролюминесцентного излучения [16]. Действительно, при записи спектров избыточный фототок, генерируемый источниками лазерной подсветки, не может проходить через внешнюю цепь, а вынужден „утекать“ из подсвечиваемого каскада через его $p-n$ -переход. Однако этот ток содержит переменную составляющую, возникающую за счет модулированного возбуждения каскада, спектр которого записывается в данный момент. Так возникает „артефактный“ сигнал [15], который, вообще говоря, будет давать погрешность в определении интегрального фототока в расчете на засветку от какого-либо стандартного источника (в нашем случае в качестве стандартного выбирался спектр излучения Солнца в наземных условиях). У этого явления есть и вторая сторона. Поглощенное в исследуемом узкозонном каскаде люминесцентное излучение создает ток, равнозначный по своему действию току утечки данного $p-n$ -перехода. Это значит, что генерируемый модулированным излу-

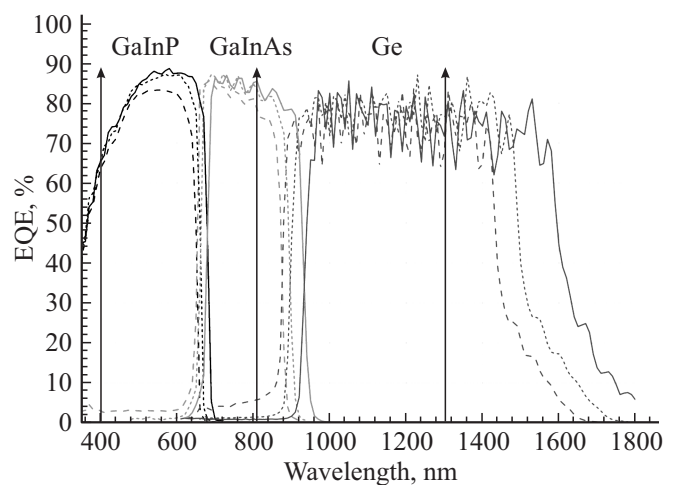


Рис. 3. Спектры фоточувствительности ФЭП типа С при трех температурах: $T = +25$ (сплошные линии), -100 (пунктирные), -197°C (штриховые линии). Длины волн генерации „закорачивающих“ лазерных источников непрерывной подсветки отмечены вертикальными стрелками. Плотности тока от источников подсветки минимальны и составляют 0.12 мА/см^2 .

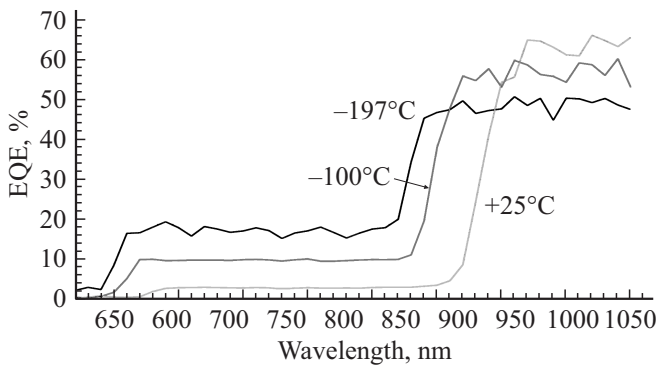


Рис. 4. Фрагменты спектров фоточувствительности нижнего каскада на основе Ge при тех же температурах, что и на рис. 3, но при плотности фототока от источников непрерывной подсветки 5.5 mA/cm^2 .

чением ток фактически оказывается под воздействием шунта, т.е. регистрируемый спектральной установкой сигнал будет заниженным.

Из изложенного следует, что подбор условий засветки при записи спектров фоточувствительности каскадных ФЭП на основе прямозонных полупроводниковых материалов становится более критичным при измерениях в области низких температур. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведены фрагменты спектров фоточувствительности нижнего каскада на основе Ge при тех же температурах, что и на рис. 3, но при плотности фототока от источников непрерывной подсветки 5.5 mA/cm^2 . Видно, что при уменьшении температуры погрешность определения внешней квантовой эффективности сбора фотогенерированных носителей в реальной полосе чувствительности нижнего каскада ($\lambda \geq 850\text{--}950 \text{ nm}$) становится неприемлемой.

4. Расчетная плотность тока короткого замыкания и световые вольт-амперные характеристики

Следует отметить, что вторичное электролюминесцентное излучение не оказывает влияния на саму по себе плотность фототока при солнечной засветке (j_{ph}), поскольку в условиях, когда через $p\text{--}n$ -переходы в каскадах не течет прямой ток, электролюминесценция отсутствует. Результаты расчетов плотности фототока для каждого каскада ФЭП типа С при кратности концентрирования излучения в одну солнечную постоянную и двух температурах $+25$ и -150°C приведены в таблице. Как можно заметить, при указанных температурах полученные значения плотности фототока ведут себя практически одинаково для солнечного спектра и для спектра имитатора солнечного излучения. Так, в обоих случаях наблюдается избыток плотности фототока в нижнем Ge-каскаде. При температуре $T = +25^\circ\text{C}$ InGaAs-каскад выступает в роли ограничивающего ток, а при $T = -150^\circ\text{C}$ таким становится InGaP-каскад. Уменьшение значения

Рассчитанные значения плотности фототока (j_{ph} , mA/cm^2) для ФЭП типа С при неконцентрированной солнечной засветке и температурах $+25$ и -150°C

Каскады ФЭП типа С	Солнечный спектр (+25/−150°C)	Спектр имитатора (+25/−150°C)
Верхний каскад (InGaP)	15.09/13.09	15.45/13.39
Средний каскад (InGaAs)	14.40/13.52	14.78/14.21
Нижний каскад (Ge)	19.33/17.60	19.20/18.22

Примечание. Расчет проведен для стандартного спектра излучения Солнца и спектра имитатора солнечного излучения, используемого в настоящей работе.

плотности фототока j_{ph} для трехпереходного ФЭП при охлаждении до -150°C , рассчитанное с использованием данных по ограничивающему каскаду, составляет 1.1 раза для солнечного спектра и 1.103 раза для спектра имитатора солнечного излучения. Исходя из этого действительно можно ожидать, что результаты измерений температурных зависимостей основных фотоэлектрических параметров при использовании данного солнечного имитатора будут вполне достоверными.

Дополнительным подтверждением обнаруженного характера поведения плотности фототока при понижении температуры служат результаты прямого сравнения световых ВАХ, приведенные на рис. 5. Представленные ВАХ измерялись при различных температурах и одной и той же кратности концентрирования солнечного излучения 100 „солнц“. Необходимо отметить, что при непосредственном сравнении плотностей тока короткого замыкания для двух температур $+25$ и -163°C (нижняя температура почти соответствует той, для которой велся расчет в таблице) уменьшение составило 5%, в то время как расчетная величина должна была составить примерно $\sim 10\%$. Расхождение является незначительным,

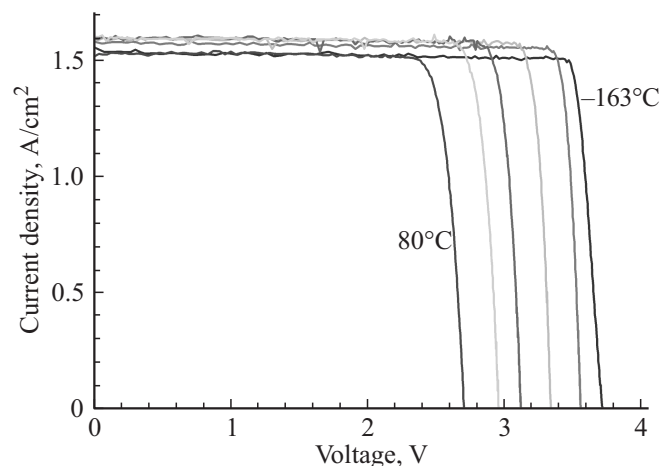


Рис. 5. Результаты прямого сравнения световых ВАХ для ФЭП типа С при температурах 80, 25, -10 , -65 , -117 , -163°C и одной и той же кратности концентрирования солнечного излучения 100 „солнц“.

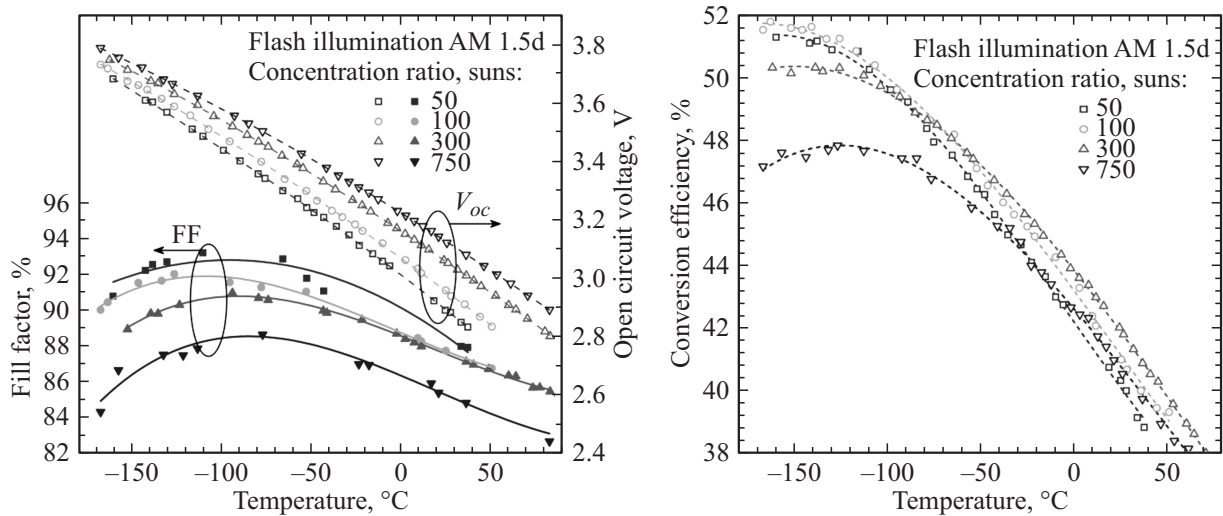


Рис. 6. Зависимости от температуры значений фактора заполнения, напряжения холостого хода и эффективности фотоэлектрического преобразования солнечного излучения в трехкаскадном ФЭП InGaP/InGaAs/Ge типа С, полученные в результате анализа световых ВАХ при кратностях концентрирования излучения 50, 100, 300 и 750 „солнц“.

однако предпочтение следует отдать непосредственным измерениям. Едва заметное уменьшение фототока, монотонное и значительное возрастание напряжения холостого хода, а также близкая к прямоугольной, не искаженная присутствием „паразитных“ потенциальных барьеров, форма ВАХ — все это факторы, обеспечивающие увеличение эффективности фотоэлектрического преобразования солнечного излучения в исследуемых каскадных ФЭП при понижении температуры.

5. Зависимости от температуры значений напряжения холостого хода, фактора заполнения вольт-амперной характеристики и эффективности фотоэлектрического преобразования

На рис. 6 представлены зависимости от температуры значений напряжения холостого хода (V_{oc}) и фактора заполнения ВАХ (FF), полученные при записи световых ВАХ при кратностях концентрирования излучения 50, 100, 300 и 750 „солнц“. Значения V_{oc} монотонно увеличиваются при уменьшении температуры от $+85$ до -170°C . Что касается значений FF, то для всех зависимостей наблюдаются пологие максимумы в диапазоне температур примерно $-(80-120)^\circ\text{C}$ для всех кратностей концентрирования излучения. Рост FF на начальном этапе охлаждения соответствует улучшению параметров ВАХ при росте генерируемого напряжения. Однако при более глубоком охлаждении увеличиваются потери на внутреннем сопротивлении ФЭП из-за уменьшения проводимости слоев в гетероструктуре.

Очевидно, для эффективности фотоэлектрического преобразования должен существовать оптимум по тем-

пературе, в котором эта эффективность максимальна. Соответствующие зависимости от температуры представлены на рис. 6. В диапазоне положительных температур, характерном для работы солнечных ФЭП в наземных условиях, эти зависимости носят монотонный характер, причем для принятых за стандартные условия $T = +25^\circ\text{C}$ значения эффективности составляют 39–41% (здесь существует свой оптимум по кратности концентрирования излучения, реализуемый при значении кратности, эквивалентной интенсивности в 300 „солнц“). При существенном понижении температуры наивысшая эффективность фотоэлектрического преобразования 52% была измерена при кратности концентрирования 100 „солнц“ и температуре -160°C . При наиболее интенсивной засветке 750 „солнц“ максимум эффективности 48% достигался при $T = -120^\circ\text{C}$.

6. Заключение

Проведенные исследования основных фотоэлектрических характеристик трехкаскадных преобразователей солнечного излучения InGaP/InGaAs/Ge показали, что использование в экспериментах низких температур, даже если они не являются характерными для работы таких приборов, позволяет получить ценную информацию о внутренней структуре и особенностях токовой генерации в них. С использованием получаемых данных можно проводить оптимизацию гетероструктур ФЭП с целью исключения „паразитных“ потенциальных барьеров, что является предпосылкой для получения высокой эффективности. На основании анализа корректным образом записанных спектров фоточувствительности, а также световых ВАХ определены зависимости от температуры таких величин, как напряжение холостого хода, фактор заполнения ВАХ и эффективность фотоэлектрического

преобразования солнечного излучения. Оценено влияние процессов переноса возбуждения из каскада в каскад посредством вторичного электролюминесцентного излучения. Наивысшая эффективность фотоэлектрического преобразования 52% была измерена при кратности концентрации 100 „солнца“ и температуре -160°C .

Настоящая работа выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Она поддержана Министерством образования и науки России, соглашение о предоставлении субсидии от 27.06.2014 г. № 14.604.21.0088, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI60414X0088.

Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Romyantsev. *Semiconductors*, **38** (8), 899 (2004).
- [2] V.D. Romyantsev. *Concentrator Photovoltaics. Springer Series in Optical Sciences* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007) v. 130, p. 151.
- [3] В.М. Андреев, Н.Ю. Давидюк, Д.А. Малевский, А.Н. Паньчак, В.Д. Румянцев, Н.А. Садчиков, А.В. Чекалин, A. Luque. *ЖТФ*, **84** (11), 72 (2014).
- [4] R. King et al. *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition* (Hamburg, Germany, 2009) p. 55.
- [5] M. Smith, B. Tillotson, J. Oliver, N. Tarasenko. *Proc. 38th IEEE Photovolt. Specialists Conf.* (Austion, USA, 2012) p. 2825.
- [6] T. Nikitina, V. Tugaenko, O. Zayats, A. Razuvaev, V.M. Andreev, N.A. Kalyuzhny, S.A. Mintairov, V.P. Khvostikov. *Proc. 28th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf. and Exhibition* (Paris, France, 2013) p. 544.
- [7] A.W. Bett, H. Lerchenmüller. *Concentrator Photovoltaics. Springer Series in Optical Sciences* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007) v. 130, p. 301.
- [8] W. Guter, J. Schöne, S.P. Philipps, M. Steiner, G. Siefer, A. Weckeli, E. Welsler, E. Oliva, A.W. Bett, F. Dimroth. *Appl. Phys. Lett.*, **94** (22), 223504 (2009).
- [9] M.Z. Shvarts, A.S. Gudovskikh, N.A. Kalyuzhnyi, S.A. Mintairov, A.A. Soluyanov, N.Kh. Timoshina, A. Luque. *AIP Conf. Proc.*, **1616**, 29 (2014).
- [10] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Romyantsev. *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Springer Series in Optical Sciences* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009) v. 140, p. 101.
- [11] В.Р. Ларионов, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Д. Румянцев. *ЖТФ*, **85** (6), 104 (2015).
- [12] V.D. Romyantsev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy, A.V. Chekalin, M.Z. Shvarts. *AIP Conf. Proc.*, **1477**, 152 (2012).
- [13] *IEC 60904-9: Photovoltaic devices — Part 9: Solar simulator performance requirements*, edn. 2 (2007).
- [14] M. Meusel, C. Baur, G. Letay, A. Bett, W. Warta, E. Fernandez. *Prog. in Photovolt.: Res. Appl.*, **11** (8), 499 (2003).
- [15] S.H. Lim, J.J. Li, E.H. Steenbergen, Y.H. Zhang. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **21** (3), 344 (2013).
- [16] V.D. Romyantsev, N.I. Kozhuchov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy. *AIP Conf. Proc.*, **1277**, 20 (2010).

Редактор Л.В. Шаронова

Photoelectric parameters of triple-junction InGaP/InGaAs/Ge solar cells in wide temperature range ($-197 \leq T \leq +85^{\circ}\text{C}$)

V.M. Andreev, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy, V.D. Romyantsev, A.V. Chekalin

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The current work focuses on investigation of essential photoelectric parameters of triple-junction InGaP/InGaAs/Ge solar cells in the wide temperature range ($-197 \leq T \leq +85^{\circ}\text{C}$). Analysis of photosensitivity spectrum and light current-voltage characteristics of the cells allowed to determine the influence of temperature on the open circuit voltage, the fill factor and the solar cell energy conversion efficiency. Illumination intensities in the study correspond to ones presented in concentrator modules. To select specimens with the least „parasitic“ potential barriers low temperatures were used. Using luminescent coupling the effect of excitation transfer between layers was investigated. The efficiency of 52% was achieved at concentration ratio of 100 suns and the temperature equal to -160°C .