

$$A(P)|_{\tau_{n+1}} = A(P)|_{\tau_n} + \frac{\Delta T(\tau_n)}{T_a(\tau_n)}. \quad (8)$$

Сутність адаптивного управління полягає у тому, що до пам'яті ПЕОМ вводять графік змінювання температури затвердіння заготовки та величину припустимого відхилення її вимірної температури від заданого значення $\Delta T_{зад}(\tau_n)$ й обчислюють величину температури в автоклаві для k -того агрегату. Потім розраховують необхідну потужність $W_a(\tau)$, що забезпечує температуру $T_a(\tau)$ в автоклаві. Далі визначають фактичну величину відхилення $\Delta T_{e.з}(\tau_i)$. Якщо його значення не перевищує припустиму величину, то обчислюють температуру в автоклаві, а також необхідну потужність для наступного інтервалу часу процесу затвердіння. Таким чином, здійснюючи зазначену процедуру для всіх інтервалів часу, одержують повний процес управління автоклавним затвердінням.

Висновок

Розроблено математичну модель процесу нагрівання вуглепластикових заготовок під час їх автоклавного затвердіння, а також запропоновано алгоритм адаптивного управління зазначеним процесом.

Список літератури: 1. Скачков В. А. Разработка автоматизированных средств управления процессами автоклавного отверждения изделий из композитов [Текст] / В. А. Скачков, В. И. Иванов, А. Б. Комаров // Материалы второго всесоюзного совещания «Применение ЭВМ в научных исследованиях и разработках». - Днепропетровск: ИЧМ УССР, 1989. – С. 89-90. 2. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов экспериментов [Текст] / Л. З. Румшинский. - М.: Наука, 1971. - 192 с.

Поступила в редколлегию 11.11.2011

УДК 621.315.592

Н.И. СЛИПЧЕНКО, проф., докт. техн. наук, , ХНУРЭ, Харьков
В.А. ПИСЬМЕНЕЦКИЙ, проф., канд.техн.наук, ХНУРЭ, Харьков
А.В. ФРОЛОВ, канд.техн.наук, Директор центра заочной формы обучения, , ХНУРЭ, Харьков
В.Л. ЛУКЬЯНЕНКО, асп., ХНУРЭ, Харьков
М.Ю. ГУРТОВОЙ, инж., ХНУРЭ, Харьков

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРА СОСТАВА X ПО ВЫХОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СТРУКТУРОЙ $Al_xGa_{1-x}As-In_xGa_{1-x}As-GaAs$

Запропоновані апроксимаційні моделі основних електрофізичних параметрів потрійних сполук $Al_xGa_{1-x}As$ і $In_xGa_{1-x}As$ при варіації параметра складу x . Досліджений вплив на вихідні характеристики параметра складу x , визначені його оптимальні значення і максимальний КПД тандемної гетероструктури.

Ключові слова: тандемні гетероструктури, фотоперетворювачі, оптимальний струм.

Предложены аппроксимационные модели основных электрофизических параметров тройных соединений $Al_xGa_{1-x}As$ и $In_xGa_{1-x}As$ при вариации параметра состава x . Исследовано влияние на выходные характеристики параметра состава x , определены его оптимальные значения и соответственно максимальный КПД тандемной гетероструктуры.

Ключевые слова: тандемные гетероструктуры, фотопреобразователи, , оптимальный ток.

The approximating models of basic electrophysical parameters of triple compounds $Al_xGa_{1-x}As$ and $In_xGa_{1-x}As$ at a composition parameter x variation are proposed. The influence of composition parameter x on output characteristics has been investigated, its optimum values and accordingly the maximum efficiency of tandem heterostructure are defined.

Key words: tandem heterostructure, photoconverters, optimum current.

1. Введение

В настоящее время наиболее эффективными фотопреобразователями (ФП) являются гетероструктуры на основе тройных соединений GaAs, а именно $Al_xGa_{1-x}As$ для широкозонного p-n перехода, практически полностью прозрачного для солнечного излучения, и $In_xGa_{1-x}As$ - для узкозонного p-n-перехода [1]. Дальнейшее увеличение КПД обеспечивают каскадные [2] или тандемные солнечные элементы, изготовленные на основе многослойных гетероструктур с двумя и более p-n-переходами в материалах с различной шириной запрещенной зоны [3,4] и другими электрофизическими параметрами.

2. Постановка задачи

Для тройных полупроводниковых соединений типа $Al_xGa_{1-x}As$ и $In_xGa_{1-x}As$ изменение основных электрофизических характеристик (в том числе параметра E_g) реализуется при изменении параметра состава x [5], что открывает потенциальную перспективу получения варизонных полупроводниковых материалов.

В то же время аналитические зависимости электрофизических характеристик для тройных соединений вида $Al_xGa_{1-x}As$ и $In_xGa_{1-x}As$ от параметра состава x практически отсутствуют. Поэтому возникает задача анализа и моделирования электрофизических параметров тройных полупроводниковых соединений указанного типа.

3. Основные результаты

На первом этапе исследований в результате обработки авторами экспериментальных данных [5], накопленных рядом зарубежных ученых, построены аппроксимационные модели, представляющие аналитические зависимости основных электрофизических параметров (диэлектрической проницаемости, собственной концентрации носителей, дрейфовой подвижности, ширины запрещенной зоны с учетом энергетических уровней зоны проводимости и валентной зон, плотности состояний в зонах, коэффициента поглощения) ранее указанных тройных соединений от параметра состава x . Для дальнейших расчетов наиболее важными из них являются ширина запрещенной зоны E_g и спектральные характеристики в виде зависимости коэффициента поглощения от энергии фотона.

Зависимости ширины запрещенной зоны E_g от параметра состава x для фронтального и тыльного p-n-переходов описываются следующими формулами

$$E_{g1} = 4 \times 10^{-3} + 0,36 + 0,63x + 0,43x^2; \quad (1)$$

$$E_{g2} = ((4,07 + 1,424) - (-0,46x) - E_C(x)), \quad (2)$$

где $E_C(x)$ - зависимость дна зоны проводимости от параметра состава x .

Графики ранее указанных зависимостей, полученные с помощью соотношения (1), для фронтального перехода $Al_xGa_{1-x}As$ и соотношения (2) для тыльного перехода $In_xGa_{1-x}As$ представлены на рис.1,а и рис.1,б соответственно.

Пунктирной горизонтальной линией на рис.1,б показан энергетический уровень дна зоны проводимости.

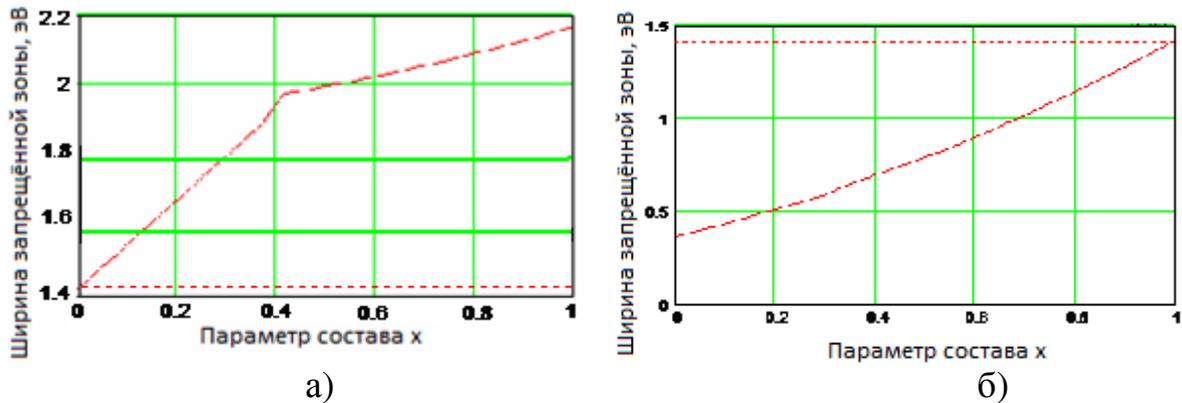


Рис.1. Зависимости ширины запрещенной зоны от параметра состава x : а) для фронтального перехода $Al_xGa_{1-x}As$; б) для тыльного перехода $In_xGa_{1-x}As$.

Аналогично были получены зависимости коэффициента поглощения для фронтального перехода на основе $Al_xGa_{1-x}As$ и тыльного перехода $In_xGa_{1-x}As$ от параметра состава x . Графики этих зависимостей приведены на рис.2 в логарифмическом масштабе.

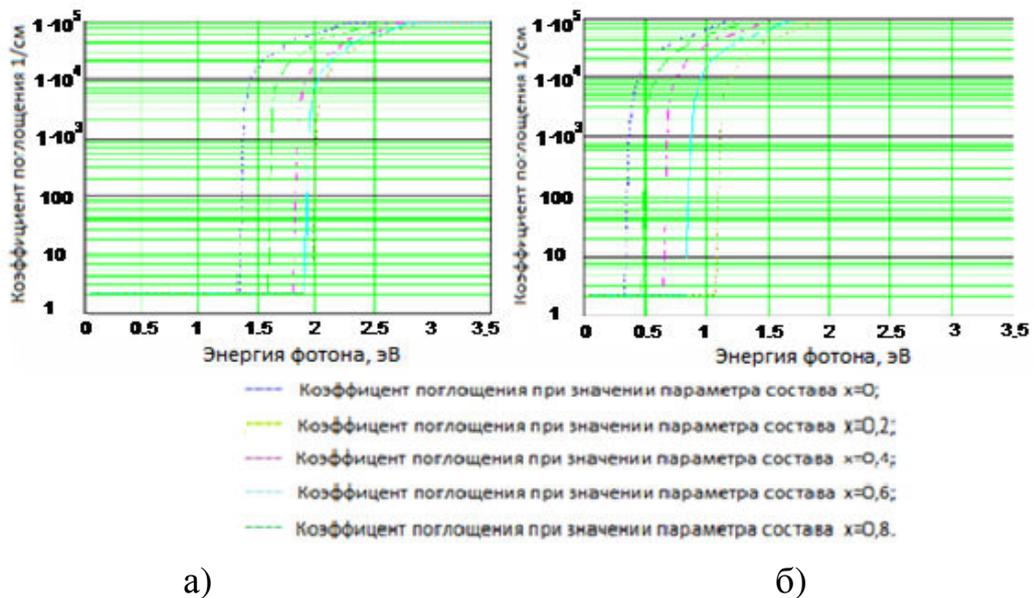


Рис.2. Зависимости коэффициента поглощения для фронтального перехода на основе $Al_xGa_{1-x}As$ (а) и тыльного перехода $In_xGa_{1-x}As$ (б) от параметра состава x

Из графиков, приведенных на рис.2,а, следует, что при увеличении параметра состава x от нуля до 0,8 увеличивается ширина запрещённой зоны E_g фронтального p-n-перехода на основе $Al_xGa_{1-x}As$. В результате ширина спектра светового потока для тыльного перехода растёт.

На рис 2,б показано увеличение ширины запрещенной зоны E_g для тыльного р-п-перехода с ростом параметра x при фиксированном значении E_g фронтального р-п-перехода. В результате разность значений E_g уменьшается.

Таким образом показано, что изменение параметра состава x от 0 до 0,8 увеличивает ширину запрещённой зоны E_g фронтального р-п-перехода на $Al_xGa_{1-x}As$ от 1,4 до 2 эВ, а тыльного перехода на $In_xGa_{1-x}As$ – от 0,4 до 1,1 эВ. Следовательно, принципиально возможно реализовать базовую ячейку многопереходной тандемной структуры с заданной шириной спектра поглощения.

Для исследования применялась спектральная методика на основе известного соотношения для удельного спектрального $S(\varepsilon)$ и энергетического потока $S_{y\partial}(\varepsilon)$ фотонов [2].

$$S(\varepsilon) = \frac{K_{osc}\zeta}{\varepsilon} \frac{2\pi \times \varepsilon^3}{h^3 \times v^2 c} \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon}{k \times T_c}\right) - 1}; S_{y\partial}(\varepsilon) = \varepsilon \times S(\varepsilon), \quad (3)$$

где ε - текущее значение энергии фотонов, эВ.

Для вычисления плотности тока генерации р-п-перехода интегрируем спектральное распределение $S_{y\partial}(\varepsilon)$, а для перехода к фототокам вводим коэффициент собирания k_{SO} , учитывающий различные виды потерь фотогенерированных носителей заряда. В результате получим

$$j_{\Gamma} = \int_{\varepsilon}^{\infty} S_{y\partial}(\varepsilon) d\varepsilon; j_{\phi 1} = k_{SO} e \int_{\varepsilon 1}^{\infty} S_{y\partial}(\varepsilon) d\varepsilon; j_{\phi 2} = k_{SO} e \int_{\varepsilon 2}^{\varepsilon 1} S_{y\partial}(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (4)$$

где $j_{\phi 1}$ и $j_{\phi 2}$ — плотности фототоков широко- и узкозонного р-п-переходов соответственно.

Для определения напряжения холостого хода используем известное соотношение при условии $J_{кз} \approx J_{\phi}$

$$U_{xx} = U_t \ln \left(\frac{J_{\phi}}{J_s} + 1 \right), \quad (5)$$

где U_t - температурный потенциал, $U_t = 26$ мВ при температуре 300 К.

Далее определяются выходное напряжение $U_{вых}$, выходной ток $I_{вых}$, выходная мощность $P_{вых}$ и КПД.

Используя изложенную методику расчета тандемного ФП получены зависимости $J_{кз}$, U_{xx} , I_{ϕ} , I_s , $U_{опт}$, $J_{опт}$, КПД тандемного ФП от параметра состава x фронтального $Al_xGa_{1-x}As$ и тыльного $In_xGa_{1-x}As$ переходов.

На рис.3 представлены зависимости плотности токов $J_{опт}$ от параметров состава фронтальной и тыльной областей.

Как было показано ранее, с ростом параметра x фронтального перехода на $Al_xGa_{1-x}As$ растёт ширина запрещённой зоны E_g . Поскольку огибающая светового спектра убывает с ростом энергии фотонов с энергией, равной или большей E_g ,

плотности токов $J_{кз}$ и $J_{опт}$ уменьшаются.

С ростом параметра x возрастает параметр E_g тыльного перехода. На интервале x (0;0.6), токи практически неизменны так как, удельный вес энергии оптического спектра соответствующий $x=0,6$ является относительно малым и не влияет на общий ток. При $x>0.6$ энергия светового потока падает более резко, что приводит к уменьшению токов.

На рис. 4 представлены зависимости U_{xx} и $U_{опт}$ от параметра x . С ростом ширины запрещённой зоны тыльного перехода, как известно, возрастает фото ЭДС или напряжение U_{xx} , что показано на рис.4.

С уменьшением плотности токов $J_{опт}$ и $J_{кз}$ уменьшаются потери на внутренних последовательных сопротивлениях и поэтому напряжения U_{xx} и $U_{опт}$ растут.

Зависимость КПД тандемного ФП от параметра x фронтального перехода представлена на рис.5 и однозначно определяется аналогичными зависимостями для $J_{опт}$ и $U_{опт}$.

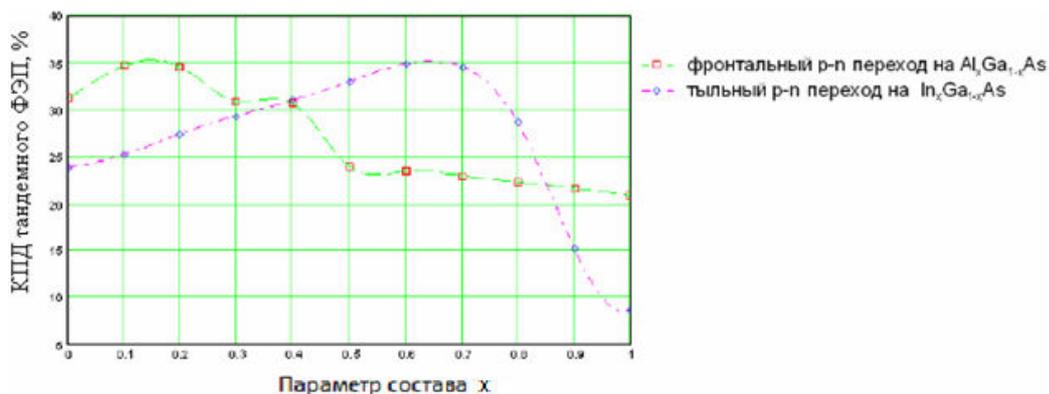


Рис.5. Зависимость КПД тандемного ФП от параметра x фронтального перехода.

На участке x (0;0.2) $J_{опт}$ слабо изменяется, а $U_{опт}$ возрастает. В результате при $x=0,15$ достигается максимальное значение КПД, при дальнейшем увеличении

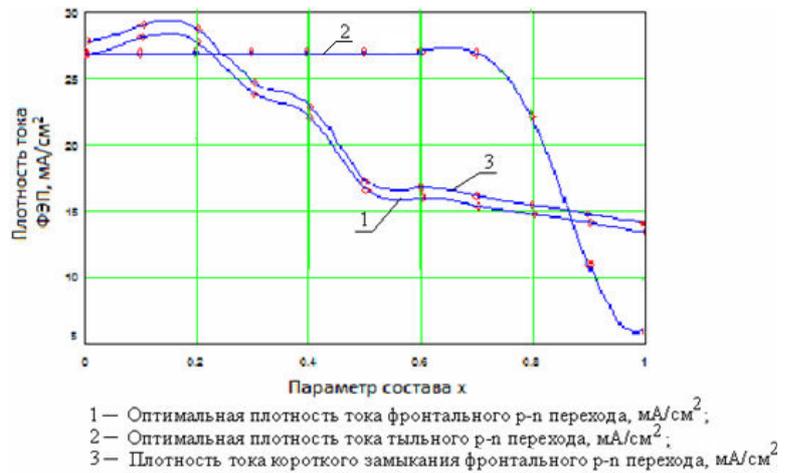


Рис.3. Зависимости плотности токов $J_{опт}$ от параметров состава фронтальной и тыльной областей

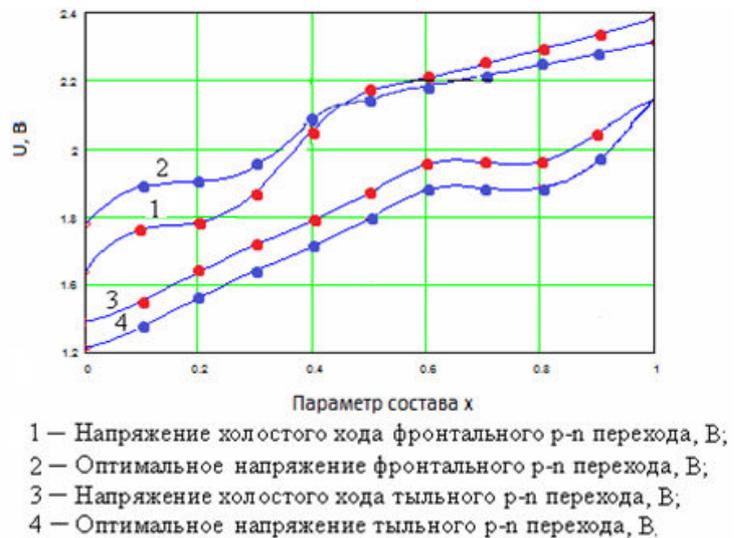


Рис.4. Зависимости U_{xx} и $U_{опт}$ от параметра x

$x > 0,2$ спад тока $J_{\text{опт}}$ происходит быстрее, чем рост напряжения $U_{\text{опт}}$, поэтому КПД в целом будет уменьшаться.

Зависимость КПД тандемной гетероструктуры от параметра состава x , тыльного перехода объясняется поведением $J_{\text{опт}}=f(x)$ и $U_{\text{опт}}=f(x)$. На интервале $x (0;0.6)$ ток $J_{\text{опт}}$ практически постоянный, а $U_{\text{опт}}$ медленно возрастает, в результате КПД так же возрастает.

На интервале $x (0.6;0.8)$ напряжение $U_{\text{опт}}$ мало изменяется, а ток $J_{\text{опт}}$ достигает максимума и резко уменьшается, что определяет дальнейшее поведение $\text{КПД} = f(x)$.

Как видно из графиков на рис.5, оптимальное значение параметра состава для фронтального p-n-перехода равняется 0,15, а для тыльного p-n-перехода — 0,65.

Ранее [3] было показано, что достижение максимальной выходной мощности тандемных ФП требует сопряжения по току широко- и узкозонного p-n-

переходов или при фиксированной ширине запрещенной зоны E_{g1} одного из них обеспечивается выбором материала второго полупроводника с необходимым значением параметра E_{g2} .

Алгоритм сопряжения p-n-переходов тандемной структуры показан на рис.6.

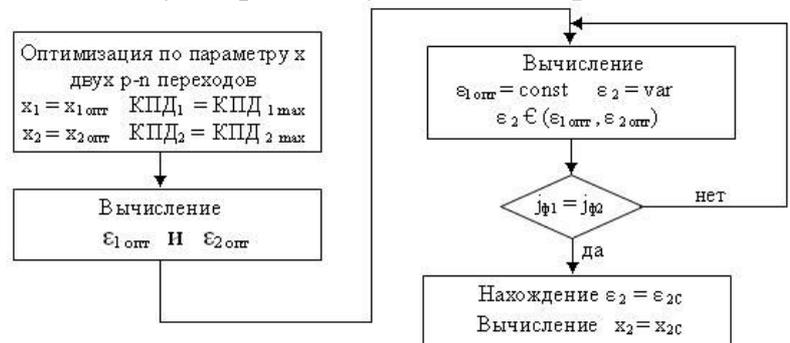


Рис.6. Алгоритм сопряжения p-n-переходов тандемной структуры

С помощью алгоритма, представленного на рис.6 и соотношений (2) и (3) при заданном значении параметра ΔE_g для широкозонного «окна» была определена ширина запрещенной зоны узкозонного p-n-перехода, которая составила 0,93 эВ. Далее с учетом оптимальных значений параметра x двух p-n-переходов для значения коэффициента собирания генерированных носителей заряда $k_{so}=0,5$ и последовательного сопротивления $R_{\text{п}}=1,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, типичного для полупроводниковых ФП, была

вычислена световая нагрузочная ВАХ и на ее основе зависимость КПД тандемного ФП от напряжения на нагрузке, представленная на рис.7. Как видим из графиков на рис.7, при общем токе для двух p-n-переходов (сплошная линия), широкозонный однопереходный ФП (пунктирная линия) обеспечивает больший вклад в

результатирующий КПД, чем узкозонный ФП (штрихпунктирная линия).

Далее по изложенной методике были выполнены расчеты выходных характеристик тандемного ФП при коэффициентах собирания k_{so} , равных 0,5, 0,6, 0,7 и 0,8.

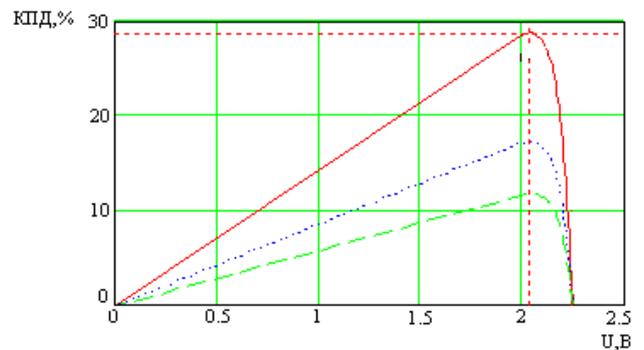


Рис.7. Зависимость КПД тандемного ФП от напряжения на нагрузке

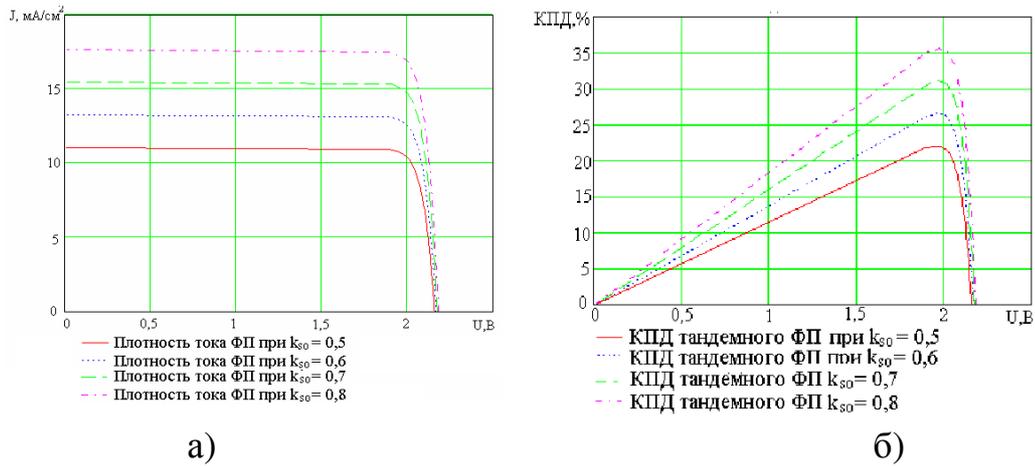


Рис. 8. Световые нагрузочные ВАХ (а) и зависимость КПД от напряжения на нагрузке (б) при параметре k_{so} равному 0,5, 0,6, 0,7 и 0,8

На рис.8,а представлены световые нагрузочные ВАХ для значений параметра k_{so} равных 0,5, 0,6, 0,7 и 0,8. Как видно из графиков, ток короткого замыкания при увеличении коэффициента собирания возрастает сильнее, чем напряжение U_{xx} , поскольку оно увеличивается по логарифмическому закону с ростом тока. Из семейства зависимостей КПД от напряжения на нагрузке при тех же значениях параметра k_{so} (рис.9) видно, что оптимальное значение U_n увеличивается с ростом k_{so} .

Основные результаты расчетов плотности тока $J_{кз}$, напряжения холостого хода U_{xx} и КПД для значений коэффициента собирания k_{so} , равных 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 представлены в табл.1.

Таблица 1. Основные результаты расчетов по всем четырем значениям коэффициента собирания генерированных носителей заряда ($K_{SO}=0,5, 0,6, 0,7, 0,8$)

Коэффициент собирания, k_{so}	Основные параметры тандемного ФП		
	Плотность тока $J_{кз}$, mA/cm^2	Напряжение U_{xx} , В	КПД, %
0,5	11,5	2,247	22,3
0,6	13,4	2,25	26,8
0,7	15,8	2,264	31,6
0,8	17,6	2,27	36,1

Из таблицы можно сделать вывод, что с ростом коэффициента собирания носителей заряда плотность тока $J_{кз}$ возрастает сильнее, чем напряжение U_{xx} . Для приближения КПД тандемных ФП к теоретическому пределу необходимо технологически уменьшить плотность дефектов в активных слоях гетероструктуры, а также дефектов на границах раздела р-п-переходов. Как отмечалось в [3], именно эти факторы улучшают процесс собирания фотостимулированных носителей заряда и ослабляют рекомбинационные процессы.

Корректность полученных результатов исследований подтверждаются характеристиками солнечных элементов на основе тандемных гетероструктур $\text{GaAs-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, изготовленных в научно-производственном предприятии «Карат», г. Львов [3].

Сказанное иллюстрируется с помощью табл.2, в которой приведены результаты исследований для значений параметра k_{so} , равных 0,6 и 0,8 и параметры тандемных ФП, изготовленных в НПП «Карат», г. Львов.

Таблица 2. Сравнение результатов исследования и параметров ФП, изготовленных в НПП «Карат», г. Львов

Источник информации	Параметры тандемных ФП		
	Плотность тока $J_{кз}$, мА/см ²	Напряжение $U_{кк}$, В	КПД, %
НПП «Карат»	15,1	2,35 – 2,43	30,1
Результаты исследований	13,4	2,25	26,8
	17,6	2,27	36,1

Как видно из таблицы, значения параметров тандемных фотопреобразователей производства НПП «Карат» (г. Львов) занимают промежуточное положение по отношению к граничным значениям аналогичных расчетных параметров.

Исследование влияния последовательного сопротивления на КПД тандемного ФП показывает, что при изменении этого параметра от 0,4 до 1,2 Ом·см² КПД изменяется не более, чем на 0,1 %.

4. Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы: достижение максимальной выходной мощности тандемных ФП требует сопряжения по току широко- и узкозонного p-n-переходов, что при фиксированной ширине запрещенной зоны ΔE_g одного из них обеспечивается выбором материала второго полупроводника с необходимым значением параметра ΔE_g .

1) тандемные ФП на основе GaAs менее критичны к изменению последовательного сопротивления R_n , чем при использовании монокристаллического кремния, поскольку обеспечивают относительно большее выходное напряжение (более 2 В) и более, чем вдвое меньшие плотности токов (15 – 17 мА).

2) Существуют оптимальные значения параметра состава x фронтального и тыльного переходов по критерию максимума КПД равные 0,15 и 0,65 соответственно, что согласуется с результатами, представленными в работе [2].

3) Представляется возможным реализовать базовую ячейку многопереходной тандемной структуры с оптимальной шириной спектра поглощения на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, используя полученные зависимости электрофизических характеристик указанных тройных полупроводниковых соединений от параметра состава x .

Список литературы: 1. Алферов, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики. [Текст] / Ж.И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // ФТП. — 2004. — Т. 38. В. 8. — С. 937-941. 2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Кн.2. Пер. с англ. – перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с. 3. Слипченко, Н.И., Письменецкий, В.А., Фролов, А.В., Лукьяненко, В.Л., Савченко, Л.В. Исследование выходных характеристик тандемных фотопреобразователей на структурах GaAs-InGaAs-AlGaAs. [Текст] : сб. науч. тр. III Международной научной конференции «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники». - Харьков-Кацивели: ХНУРЭ, 2010. - С.230-233. 4. Круковский, С. И. Солнечные элементы на основе тандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs [Текст] / С. И. Круковский, Ю. Е. Николаенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — №6. — С.39-40. 5. Anderson, R.L. Experiments on Ge-GaAs heterojunctions [Текст] / R.L. Anderson. Solid State Electron. - 1962. - V.5, I.5. - P.341.

Поступила в редколлегию 06.11.2011