

Оптимизация толщины слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ в трехкаскадном $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ солнечном элементе

© Д.М. Леган, О.П. Пчеляков, В.В. Преображенский

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: dmlegan@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 9 августа 2019 г.

В окончательной редакции 12 августа 2019 г.

Принята к публикации 12 августа 2019 г.

С помощью программного пакета для приборно-технологического моделирования „Sentaurus TCAD“ производился поиск оптимальной толщины поглощающего слоя нижнего каскада $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ трехкаскадного $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ солнечного элемента в зависимости от времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое. Величина времени жизни задавалась в диапазоне от 17 пс до 53 нс. Результаты расчета показали, что в зависимости от величины времени жизни оптимальная толщина принимает различные значения в диапазоне от 0.9 до 7.5 мкм. Также была проведена оценка вклада в КПД данного трехкаскадного солнечного элемента от нижнего $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ каскада. При различных значениях времен жизни, его величина составила от 1 до 7%.

Ключевые слова: численное моделирование, оптимальная толщина, солнечный элемент, $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, Sentaurus TCAD.

DOI: 10.21883/FTP.2020.01.48776.9240

1. Введение

Традиционно, в большинстве спутников и других космических аппаратов используются трехкаскадные $\text{Ge}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ солнечные элементы (СЭ), выращенные на подложках германия [1]. Однако у этих СЭ существует недостаток, который заключается в несогласованности ширины запрещенной зоны нижнего каскада Ge по отношению к остальным каскадам. Ширина запрещенной зоны германия в этом трехкаскадном СЭ меньше оптимальной, что приводит к тому, что ток неравновесных носителей заряда, вызванный поглощением фотонов в этом каскаде, получается избыточным по отношению к току широкозонных каскадов. Но общий ток многокаскадного СЭ определяется наименьшим током неравновесных носителей заряда в каком-либо из каскадов. Поэтому в итоге общий ток СЭ не отличается от токов в каскадах GaAs и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, при незначительном вкладе в общее выходное напряжение СЭ от каскада Ge.

Альтернативой СЭ с германиевым каскадом являются трехкаскадные $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ СЭ [2], которые уже начали проходить испытания в космосе [3]. За счет оптимально подобранной ширины запрещенной зоны нижнего каскада $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ($E_g \approx 1$ эВ) удается добиться согласованности по току неравновесных носителей заряда во всех трех каскадах и получить значительный вклад в выходное напряжение СЭ от нижнего каскада $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Однако создание эффективного трехкаскадного СЭ, основанного на этих трех материалах является не простой задачей, поскольку постоянная решетки твердого раствора $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ отличается от постоянных решеток GaAs и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ (у последних

двух они совпадают). Из-за рассогласования постоянных решеток, при росте данного трехкаскадного СЭ, в структуре возникают прорастающие дислокации, которые в конечном итоге оказывают пагубное влияние на эффективность СЭ. Поэтому, во-первых, при росте данного трехкаскадного СЭ используется не прямой рост, а инвертированный. А именно сначала на подложке GaAs выращивается верхний каскад $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, затем средний каскад GaAs и только потом каскад $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, чтобы дислокации возникали только в каскаде $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, а не во всех трех каскадах, как это было бы при прямом росте. После этого вся эта структура, вместе с подложкой, переносится на промежуточный носитель, например, стекло, кремниевую подложку, металлический радиатор или гибкую полимерную пленку, а затем подложка удаляется путем ее полного травливания либо с помощью технологии „Epitaxial Lift-Off“ [4]. Во-вторых, необходимо подобрать оптимальную толщину поглощающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, которая определяется временем жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) и коэффициентом поглощения света в этом слое. Оптимальной толщиной слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ является толщина, которой соответствует максимальный вклад в КПД трехкаскадного СЭ от нижнего каскада $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Так как прорастающие дислокации создают центры рекомбинации, то от их плотности зависит время жизни ННЗ. Если толщина поглощающего слоя будет больше оптимальной при данной плотности дислокаций, то сгенерированные светом носители заряда не будут успевать доходить до соответствующих контактов. С другой стороны, при толщине слоя меньше оптимальной уменьшается доля поглощенных фотонов. Оба этих обстоятельства приводят к потере эффективности СЭ. Поэтому целью дан-

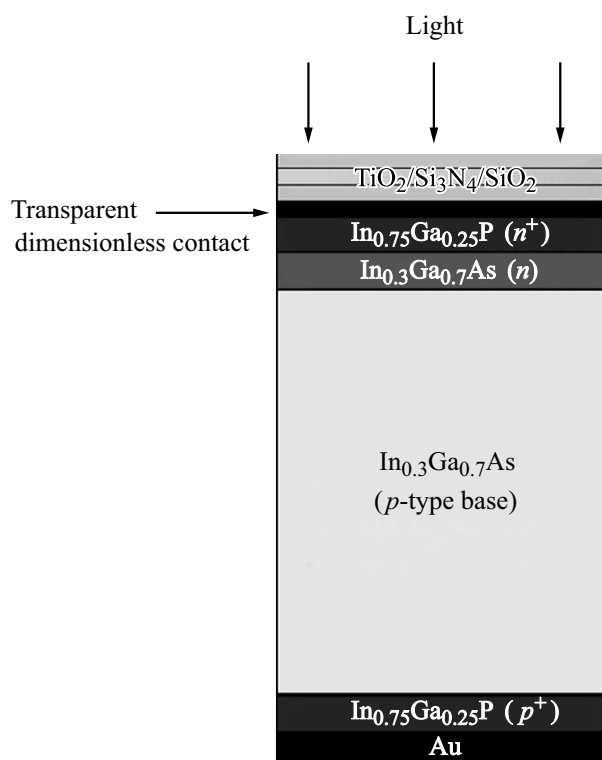


Рис. 1. Схематичное изображение структуры моделируемого солнечного элемента.

ной работы являлось вычисление оптимальной толщины поглощающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ в трехкаскадном СЭ в зависимости от величины времени жизни ННЗ в этом слое.

2. Параметры моделирования

При моделировании конкретные значения времени жизни ННЗ задавались в качестве параметра для расчета скорости рекомбинации по механизму Шокли–Рида–Холла. Также в расчете учитывались излучательная и Оже рекомбинации.

На рис. 1 схематично изображена структура моделируемого солнечного элемента. В ее основе лежат данные из работ [2,5]. Для увеличения числа поглощенных фотонов использовалось тройное просветляющее покрытие $\text{TiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$, взятое за основу из работы [6]. За основу спектра падающего излучения были взяты стандартные солнечные спектры AM0 и AM1.5d за вычетом тех фотонов, чьи энергии превышали значения энергии ширины запрещенной зоны арсенида галлия, т.е. предполагалось, что все фотоны с энергией $E \geq E_g(\text{GaAs}) = 1.42 \text{ эВ}$ поглощались в двух верхних каскадах: GaAs и $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$. В данной модели нижний контакт был сделан золотым, а сверху был смоделирован прозрачный, безразмерный контакт, который не препятствовал прохождению света в глубь полупроводника, но который при этом эффективно собирал все доходящие до

него электроны. Время жизни ННЗ в слое $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ варьировалось в пределах от 17 пс до 53 нс. Для уменьшения рекомбинационных потерь сверху и снизу каскада $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ были предусмотрены слои из широкозонного материала $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{P}$ ($E_g \approx 1.61 \text{ эВ}$), согласованного по параметру решетки с $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, в которых поглощение света не происходило. Степень легирования основного поглощающего слоя (базового слоя) каскада $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ принималась равной $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Моделирование работы каскада $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ проводилось с помощью программного пакета Sentaurus TCAD, в котором для нахождения вольт-амперной характеристики солнечного элемента решалась система уравнений, состоящая из уравнений непрерывности для электронов и дырок, и уравнения Пуассона. На основе вольт-амперной характеристики находилась точка максимальной выходной мощности солнечного элемента. Данные о слоях моделируемой структуры представлены в таблице.

3. Результаты моделирования

На рис. 2 представлена полученная зависимость оптимальной толщины базового поглощающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ от величины времени жизни ННЗ в этом слое. Последняя точка на графике соответствует значению времени жизни, равному 13.3 нс. При больших значениях времен жизни оптимальная толщина поглощающего слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ больше не увеличивалась и оставалась равной 7.5 мкм. Это связано с тем, что на этой толщине практически все фотоны успевают поглотиться в слое $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и потому дальнейшее увеличение толщины поглощающего (базового) слоя не имеет никакого смысла.

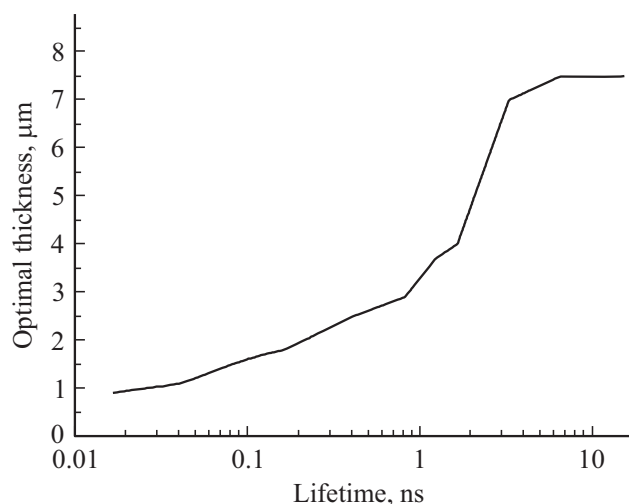


Рис. 2. Расчетная зависимость оптимальной толщины поглощающего (базового) слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ от времени жизни ННЗ в этом слое для спектров AM0 и AM1.5d (зависимость одинаковая).

Данные о слоях моделируемой структуры

Слой	Материал	Толщина	Степень легирования, $см^{-3}$
Верхний слой просветляющего покрытия	TiO_2	25 нм	—
Средний слой просветляющего покрытия	Si_3N_4	30 нм	—
Нижний слой просветляющего покрытия	SiO_2	75 нм	—
Верхний прозрачный контакт	—	—	—
Широкозонное окно	$In_{0.75}Ga_{0.25}P$	0.1 мкм	10^{19} (n -тип)
Эмиттер	$In_{0.3}Ga_{0.7}As$	0.1 мкм	$9 \cdot 10^{17}$ (n -тип)
База	$In_{0.3}Ga_{0.7}As$	d -переменная, мкм	$5 \cdot 10^{16}$ (p -тип)
Нижний широкозонный материал	$In_{0.75}Ga_{0.25}P$	0.1 мкм	10^{19} (p -тип)
Нижний контакт	Au	1.2 мкм	—

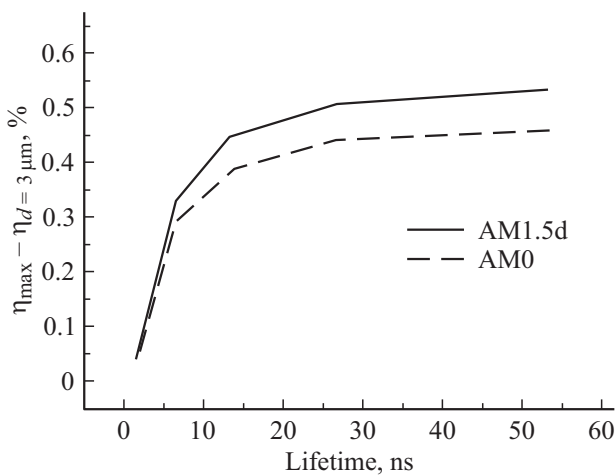


Рис. 3. Зависимость разницы в КПД, рассчитанных при оптимальной толщине поглощающего (базового) слоя и при толщине базового слоя, равной 3 мкм, от времени жизни ННЗ для спектров AM0 и AM1.5d.

Как видно из графика полученной зависимости, оптимальная толщина поглощающего слоя $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ сильно зависит от величины времени жизни ННЗ. При изменении времени жизни от 17 пс до 6.7 нс оптимальная толщина изменяется в пределах от 0.9 до 7.5 мкм.

Далее была проведена оценка эффективности работы нижнего $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ каскада при толщине поглощающего слоя, равной оптимальной, по сравнению со стандартной толщиной, равной ~ 3 мкм, которую обычно используют при создании трехкаскадного СЭ данного типа в большинстве исследовательских работ [2,5,7].

Для проведения данной оценки было решено посмотреть на то, как подбор оптимальной толщины увеличивает общую эффективность работы всего трехкаскадного $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$ СЭ в зависимости от времени жизни ННЗ. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Из графика полученной зависимости видно, что в первой точке, где время жизни равно 1.67 нс, увеличения общего КПД данного трехкаскадного солнечного

элемента практически не происходит, т.е. на оптимальной толщине эффективность работы нижнего каскада приблизительно такая же. Однако при увеличении времени жизни ННЗ выигрыш от применения оптимальной толщины начинает резко увеличиваться и при времени жизни ННЗ, равном 26.7 нс, начинает выходить „на полку“. Возможность создания структур данного типа с величинами времен жизни ННЗ ~ 25 нс показана, например, в работе [8]. Как видно из графика, выигрыш от применения оптимальной толщины при данном значении времени жизни ННЗ составляет 0.5%. Для солнечных элементов, применяемых в космосе, это является ощутимой величиной вследствие того, что требование к значениям КПД в них очень высоки.

Также следует отметить, что при малых значениях времен жизни ННЗ, ~ 0.1 нс и меньше, оптимальная толщина поглощающего (базового) слоя будет явно меньше 3 мкм и разница в выигрыше общего КПД между η_{max} и $\eta_{d=3 \text{ мкм}}$ вновь станет ощутимой, однако данные об этом выигрыше в настоящей работе приводиться не будут, так как при столь малых временах жизни

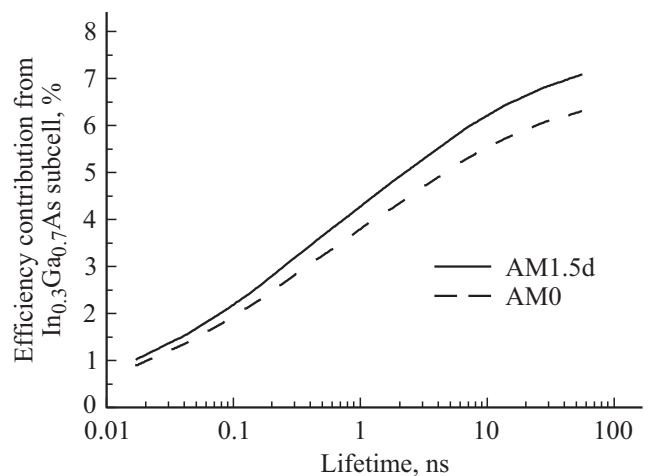


Рис. 4. Расчетная зависимость вклада в КПД трехкаскадного $In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs/In_{0.5}Ga_{0.5}P$ солнечного элемента от нижнего каскада $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ при различных значениях времен жизни ННЗ в слое $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ для спектров AM0 и AM1.5d.

ННЗ общий выходной ток трехкаскадного СЭ будет ограничиваться малым током в нижнем $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ каскаде, что недопустимо при создании многокаскадных солнечных элементов.

На рис. 4 приведена зависимость вклада в КПД трехкаскадного $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ СЭ от нижнего каскада при различных значениях времен жизни ННЗ в поглощающем (базовом) слое $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Вычисление КПД производилось на оптимальной толщине базового слоя для каждого конкретного времени жизни ННЗ. Величина времени жизни ННЗ на этом графике изменяется в пределах от 17 пс до 53 нс. Из графика видно, что этот вклад составляет величину от 1 до 7%. Обратив внимание на то, что шкала логарифмическая, не трудно заметить, что график отражает физическую зависимость диффузионной длины неосновных носителей заряда L_{diff} , а значит, и величины тока солнечного элемента от $\sqrt{\tau}$.

4. Заключение

С помощью математического моделирования в программном пакете Sentaurus TCAD была получена зависимость оптимальной толщины базового слоя $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ в трехкаскадном СЭ от времени жизни неосновных носителей заряда в этом слое. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологии выращивания гетероструктур $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, создаваемых для высокоэффективных солнечных элементов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках ГЗ 0306-2016-0011, 0306-2018-0011 и при поддержке гранта РФФИ № 16-29-03292.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. King, C. Fetzel, D. Law, K. Edmondson, H. Yoon, G. Kinsey, D. Krut, J. Ermer, P. Hebert, B. Cvicchi, N. Karam. *Proc. 4th IEEE World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (Waikoloa, Hawaii, USA, 2006) v. 2, p. 1757.
- [2] J.F. Geisz, S. Kurtz, M. Wanlass, J.S. Ward, A. Duda, D.J. Friedman, J.M. Olson, W.E. McMahon, T.E. Moriarty, J.T. Kiehl. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 023502 (2007).
- [3] T. Takamoto, H. Washio, H. Juso. *Proc. 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.* (Denver, Colorado, USA, 2014).
- [4] C. Youtsey, J. Adams, R. Chan, V. Elarde, G. Hillier, M. Osowski, D. McCallum, H. Miyamoto, N. Pan, C. Stender, R. Tatavertti, F. Tuminello, A. Wibowo. *Proc. 26th CS MANTECH Conf.* (Boston, Massachusetts, USA, 2012).
- [5] J. Bi, G. Lin, J. Liu, M. Song, L. Wang, W. Xiong, Z. Wu, Z. Lin. *Proc. 8th Int. Conf. on Concentrating Photovoltaic Systems* (Toledo, Spain, 2012) v. 1477, p. 57.

- [6] В.М. Андреев, А.В. Малевская, А.С. Гудовских, Ю.М. Задранов. Патент № 2436191 (<http://www.freepatent.ru/patents/2436191>).
- [7] D. Xue, J. Tu, W. Lai, W. Zhang, Y. Seng, T. Guo. 2D-simulation of Inverted Metamorphic GaInP/GaAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}$ Four-junction Solar Cell. *Proc. Int. Conf. on Power Engineering & Energy, Environment (PEEE 2016)* (Shanghai, China).
- [8] M. Niemeyer, J. Ohlmann, A.W. Walker, P. Kleinschmidt, R. Lang, T. Hannappel, F. Dimroth, D. Lackner. *J. Appl. Phys.*, **122**, 115702 (2017).

Редактор А.Н. Смирнов

$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ layer thickness optimization in the triple-junction $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ solar cell

D.M. Legan, O.P. Pchelyakov, V.V. Preobrazhenskii

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The search of the optimal absorbing layer thickness in the bottom $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ subcell of the triple-junction $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ solar cell was carried out assisted by the Sentaurus TCAD software package, depending on the minority charge carrier lifetime in this layer. The lifetime value was set manually and it was in the range from 17 ps to 53 ns. The calculation results showed that the optimal thickness varies from 0.9 to 7.5 μm . The estimation of the efficiency contribution of the bottom $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ subcell to the given triple-junction solar cell, at various lifetime values, was made. Its value varied from 1 to 7%.