

07

AlGaAs-субэлементы для гибридных $A_3B_5//Si$ солнечных элементов

© С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 26 августа 2025 г.

В окончательной редакции 7 октября 2025 г.

Принято к публикации 7 октября 2025 г.

Определены диффузионные длины неосновных носителей заряда в слоях $Al_xGa_{1-x}As$ ($AlGaAs$) с концентрацией алюминия x от 0 до 0.2 посредством аппроксимации спектров квантового выхода фотоответа однопереходных солнечных элементов с фотоактивными слоями из $AlGaAs$. Проведены расчеты спектров внешнего квантового выхода фотоответа для субэлементов $GaInP$, $AlGaAs$ и Si гибридных $GaInP/AlGaAs/Si$ солнечных элементов космического назначения. Показано, что $GaInP/AlGaAs/Si$ солнечные элементы обеспечивают КПД на уровне 33.5% (1 sun, AM0) при полном собирании носителей из базового слоя $AlGaAs$ -субэлемента и концентрации алюминия $x = 0.1$, 33 % (1 sun, AM0) при использовании градиентного состава в базовом слое и средней концентрации алюминия $x = 0.08$ и 32.8 % (1 sun, AM0) при использовании постоянной концентрации алюминия $x = 0.08$.

Ключевые слова: гибридные солнечные элементы, субэлемент, газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, КПД, квантовая эффективность, математическое моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.03.62184.20481

В настоящее время на орбите Земли находится более 6000 спутников, из которых более половины используется для различных гражданских целей [1]: системы связи (интернет, сотовая связь, радио, телевидение), глобальная система позиционирования (локационные сервисы и навигация), наблюдение за Землей, зондирование и мониторинг (отслеживание погоды, прогнозирование стихийных бедствий). При этом одним из важнейших компонентов космических летательных аппаратов, находящихся как на околоземной орбите, так и вдали от нее, является система генерации энергии.

Интенсивность солнечного излучения во внешней атмосфере Земли со спектральным распределением, обозначенным как AM0, составляет 1367 W/m^2 . Обычно солнечные элементы (СЭ), являющиеся единственным источником энергии для космических аппаратов, представляют собой гетероструктурные устройства, состоящие из нескольких различных материалов, эпитаксиально осажденных на подложку. Наибольшее применение в фотоэлектрических технологиях для космических задач получили кремний и полупроводники, используемые для многопереходных (МП) СЭ: Ge, полупроводники A_3B_5 , такие как $GaAs$, InP , и твердые растворы A_3B_5 ($InGaP$, $InGaAs$, $InGaNAs$, $AlInGaP$ и $AlInGaAs$) [2].

В частности, МП СЭ на основе $InGaP/InGaAs/Ge$ и $AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge$, производимые компаниями Azur Space, Spectrolab, SolAero и CESI для различных космических миссий, в настоящее время являются стандартом в аэрокосмической области, поскольку они демонстрируют лучшие характеристики, чем другие технологии фотоэлектрических систем [2]. Например, коммерчески доступные МП СЭ $AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge$, производимые Azur Space, демонстрируют эффектив-

ность преобразования до 32% (1 sun, AM0) в начале срока службы и 28.7% (1 sun, AM0) в конце срока службы, т.е. после облучения электронами с энергией 1 MeV и дозой 10^{15} cm^{-2} , что в настоящее время является лучшим результатом для космических СЭ. Несмотря на свои характеристики, МП СЭ имеют ряд недостатков, таких как жесткость, толщина (от ~ 80 до $\sim 200\mu m$), большой удельный вес (удельная мощность для $GaInP/Ga(In)As/Ge$ трехпереходных СЭ составляет $\sim 0.4\text{--}0.8\text{ W/g}$ [3,4]), хотя использование инвертированных технологий может привести к значениям до 3.8 W/g для $InGaP/GaAs/InGaAs$ СЭ [5]. Однако производство инвертированных МП СЭ является очень сложным, что делает такие СЭ чрезвычайно дорогими [6].

В настоящее время исследовательская деятельность в области инновационных фотоэлектрических технологий для будущих космических миссий сосредоточена не только на увеличении КПД (из-за высоких требований к мощности), но и на улучшении массогабаритных параметров. Одним из возможных решений данных задач является „ бондинг“ (склеивание) СЭ на основе полупроводников A_3B_5 и кремниевых СЭ, так как кремний весит меньше в сравнении с другими материалами, применимыми в качестве подложки для МП СЭ. Так как толщина эпитаксиальной структуры ($5\text{--}7\mu m$) и металлических контактов ($2\text{--}3\mu m$) много меньше толщины подложки ($80\text{--}200\mu m$), вес последней определяет удельную мощность МП СЭ. Плотность германия (5.323 g/cm^2) и арсенида галлия (5.318 g/cm^2), используемых в качестве подложек для МП СЭ, более чем в 2 раза превышает плотность кремния (2.33 g/cm^2), что позволяет ожидать более чем двукратное улучшение удельной плотности мощности для $A_3B_5//Si$ гибридных

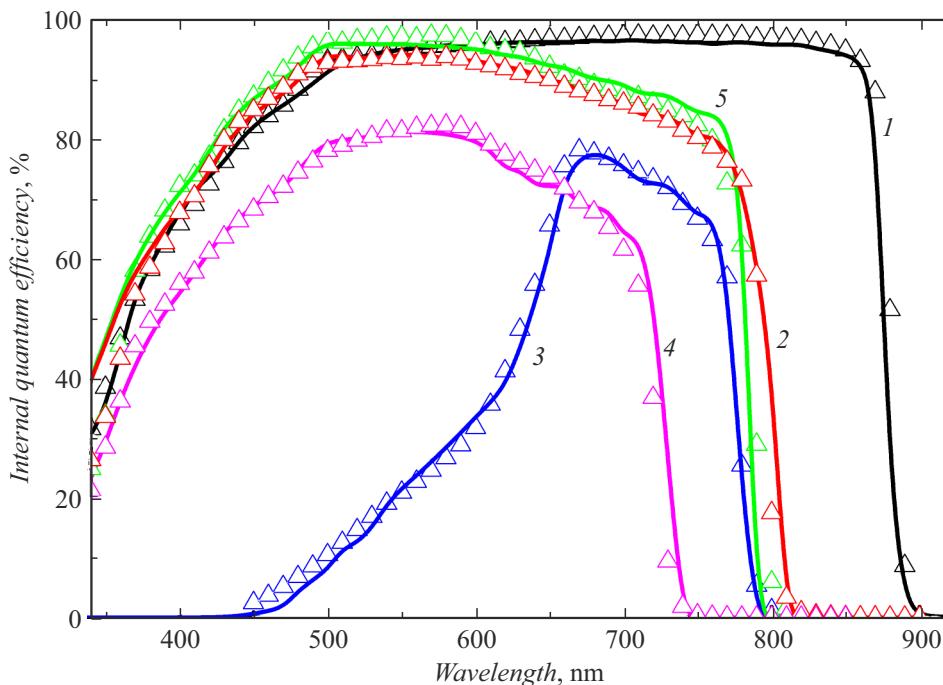


Рис. 1. Измеренные (символы) и расчетные (линии) спектры внутренней квантовой эффективности для СЭ на основе GaAs (1), Al_{0.11}Ga_{0.89}As (2), Al_{0.14}Ga_{0.86}As с оптическим фильтром GaInP толщиной 350 nm (3), Al_{0.2}Ga_{0.8}As (4), а также с градиентным базовым слоем от Al_{0.15}Ga_{0.85}As до Al_{0.11}Ga_{0.89}As (5).

солнечных элементов (ГСЭ) по сравнению с таковой для МП СЭ, выращиваемых на подложках Ge и GaAs. Успешные варианты „бондинга“ двухпереходных тандемов GaInP/GaAs и GaInP/GaInAsP с однопереходным Si СЭ были недавно продемонстрированы в работах [7,8].

В нашей предыдущей работе [9] были проведены расчеты спектров внешнего квантового выхода фотоответа для GaInP-, Ga(In)As- и Si-субэлементов GaInP/Ga(In)As//Si ГСЭ космического назначения и показано, что замена среднего и нижнего субэлементов в GaInP/Ga(In)As/Ge-структуре на GaAs и Si соответственно позволит повысить КПД с 29.4 до 30.8 % (1 sun, AM0) при одновременном улучшении энергомассовых параметров и срока активной эксплуатации космических солнечных батарей.

В настоящей работе описывается дальнейшая оптимизация структуры GaInP/GaAs//Si ГСЭ за счет введения атомов алюминия в фотоактивные слои среднего (GaAs) субэлемента. Увеличение ширины запрещенной зоны субэлементов ГСЭ будет приводить к увеличению генерируемого ими напряжения, что в свою очередь приведет к увеличению КПД ГСЭ. Однако введение алюминия в арсенид галлия, как известно, будет приводить и к снижению диффузационных длин неосновных носителей заряда, что может негативно отразиться на работе AlGaAs-субэлемента.

Для определения диффузационных длин в слоях AlGaAs были выращены структуры СЭ на основе GaAs, Al_{0.11}Ga_{0.89}As, Al_{0.14}Ga_{0.86}As с оптическим фильт-

ром GaInP толщиной 350 nm, Al_{0.2}Ga_{0.8}As, а также с градиентным базовым слоем от Al_{0.15}Ga_{0.85}As до Al_{0.11}Ga_{0.89}As. Исследуемые структуры СЭ были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке *p*⁺-GaAs (100) и включали последовательно осажденные на подложку слой тыльного потенциального барьера *p*-Al_{0.3}Ga_{0.7}As толщиной 100 nm, базовый слой *p*-Al_xGa_{1-x}As толщиной 3000 nm, эмиттерный слой *n*-Al_xGa_{1-x}As толщиной 100 nm и слой широкозонного окна *n*-Al_{0.9}Ga_{0.1}As толщиной 35 nm. Из данных структур были изготовлены СЭ, измеренные спектральные характеристики которых представлены на рис. 1 (символы). Математическое моделирование спектральных характеристик однопереходных Al_xGa_{1-x}As СЭ (линии на рис. 1) по методике, описанной в [10], позволило определить диффузационные длины неосновных носителей заряда в фотоактивных слоях AlGaAs (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что увеличение концентрации алюминия в фотоактивных слоях СЭ приводит к значительному падению диффузационной длины в базовом слое, из которого происходит основное сопирание фотогенерированного тока (ФГТ). При этом введение градиентного состава, создающего электрическое тянувшее поле для фотогенерированных носителей, в базовый слой позволяет в некоторой степени нивелировать это падение (рис. 2).

На основании данных по диффузационным длинам были рассчитаны утилитарные и структурные параметры

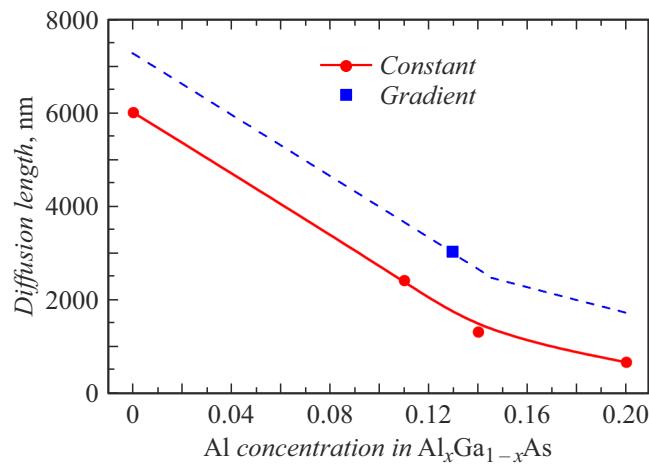


Рис. 2. Зависимости диффузационной длины электронов в базе AlGaAs от состава твердого раствора для постоянного состава (кружки) и градиентного состава (квадрат). Штриховой линией показана аппроксимация для диффузационной длины.

GaInP/AlGaAs//Si ГСЭ для трех случаев: полное собирание фотогенерированных носителей (диффузационная длина в базе много больше ее толщины), использование градиентного состава (диффузионные длины брались по штриховой линии на рис. 2) и постоянного состава в базовом слое AlGaAs-субэлементов (диффузионные длины брались по сплошной линии на рис. 2). ФГТ рассчитывались по методике, описанной в [10], путем варьирования толщин фотоактивных слоев верхнего (GaInP) и среднего (AlGaAs) субэлементов GaInP/AlGaAs//Si ГСЭ до достижения равенства ФГТ субэлементов. Расчеты напряжения холостого хода и КПД ГСЭ проводились по методике, описанной в [9], с использованием GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ с КПД 29.4% (1 sun, AM0) в качестве референсного СЭ.

Данные расчетов приведены на рис. 3. Напряжение холостого хода GaInP/GaAs//Si ГСЭ составляет 3.24 V и увеличивается с увеличением концентрации алюминия в среднем субэлементе (рис. 3, b), а расчетный КПД составляет 31.9% (рис. 3, e). При этом полное согласование ФГТ для GaInP/GaAs//Si ГСЭ на уровне 15.1 mA/cm² (рис. 3, a) достигается при толщине фотоактивных слоев верхнего субэлемента 340 nm (рис. 3, c) и толщине фотоактивных слоев среднего субэлемента 770 nm (рис. 3, d). Эти толщины значительно меньше соответствующих толщин референсного GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ (штриховые линии на рис. 3).

Добавление алюминия в фотоактивные слои среднего субэлемента приводит к сдвигу края его поглощения в коротковолновую область. Это влечет за собой необходимость увеличивать толщину базового слоя для обеспечения поглощения такого же количества фотонов (рис. 3, d), что повышает требования к значению диффузционной длины электронов в базовом слое $Al_xGa_{1-x}As$.

субэлемента. Вплоть до $x = 0.06$ это не сказывается на собирании фотогенерированных носителей из базового слоя (рис. 3, a), но при больших значениях x ФГТ с учетом определенных ранее диффузионных длин начинает уменьшаться (рис. 3, a). Для $x > 0.1$ полное согласование ФГТ GaInP/ $Al_xGa_{1-x}As//Si$ ГСЭ становится невозможным, так как в нижний (кремниевый) субэлемент проходит слишком большое количество фотонов, и ФГТ начинает уменьшаться даже при полном собирании из базового слоя $Al_xGa_{1-x}As$ -субэлемента (рис. 3, a). При этом толщина фотоактивных слоев $Al_xGa_{1-x}As$ -субэлемента становится равной 5000 nm (рис. 3, d), что необходимо для полного поглощения всех фотонов с энергией, большей ширины запрещенной зоны $Al_xGa_{1-x}As$, а толщина фотоактивных слоев GaInP-субэлемента начинает уменьшаться (рис. 3, c) для прохода части фотонов в $Al_xGa_{1-x}As$ -субэлемент и повышения его ФГТ.

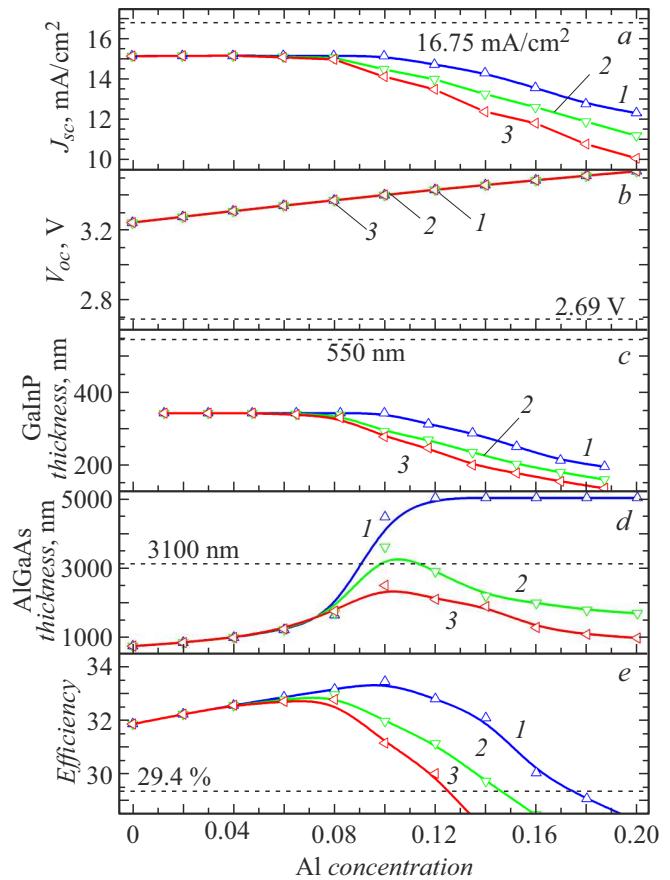


Рис. 3. Зависимости тока короткого замыкания (a), напряжения холостого хода (b), толщины фотоактивных слоев GaInP-субэлемента (c), толщины фотоактивных слоев AlGaAs-субэлемента (d) и КПД (e) для GaInP/AlGaAs//Si ГСЭ, согласованных по ФГТ для случаев полного собирания фотогенерированных носителей из базового слоя AlGaAs (1), их собирания согласно диффузионным длинам при градиентном составе базы (2) и их собирания согласно диффузионным длинам при постоянном составе базы (3). Штриховые линии показывают характеристики референсного GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ.

Проведенные расчеты показали (рис. 3, e), что GaInP/Al_xGa_{1-x}As/Si ГСЭ обеспечивают КПД на уровне 33.5 % (1 sun, AM0) при полном собирании носителей и концентрации алюминия $x = 0.1$, 33% (1 sun, AM0) при использовании градиента и средней концентрации алюминия $x = 0.08$ и 32.8 % (1 sun, AM0) при использовании постоянной концентрации алюминия $x = 0.08$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Greco, *UCS Satellite Database* [Электронный ресурс]. <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>
- [2] R. Verduci, V. Romano, G. Brunetti, N.Y. Nia, A. Di Carlo, G. D'Angelo, C. Ciminell, *Adv. Energy Mater.*, **12**, 2200125 (2022). DOI: 10.1002/aenm.202200125
- [3] M. Kaltenbrunner, G. Adam, E.D. Głowacki, M. Drack, R. Schwödiauer, L. Leonat, D.H. Apaydin, H. Groiss, M.C. Scharber, M.S. White, N.S. Sariciftci, S. Bauer, *Nat. Mater.*, **14**, 1032 (2015). DOI: 10.1038/nmat4388
- [4] F. Lang, M. Jošt, K. Frohna, E. Köhnen, A. Al-Ashouri, A.R. Bowman, T. Bertram, A.B. Morales-Vilches, D. Koushik, E.M. Tennyson, K. Galkowski, G. Landi, M. Creatore, B. Stannowski, C.A. Kaufmann, J. Bundesmann, J. Rappich, B. Rech, A. Denker, S. Albrecht, H.C. Neitzert, N.H. Nickel, S.D. Stranks, *Joule*, **4**, 1054 (2020). DOI: 10.1016/j.joule.2020.03.006
- [5] D. Cardwell, A. Kirk, C. Stender, A. Wibowo, F. Tuminello, M. Drees, R. Chan, M. Osowski, N. Pan, in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (IEEE, 2017), p. 3511. DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366552
- [6] J. Li, A. Aierken, Y. Liu, Y. Zhuang, X. Yang, J.H. Mo, R.K. Fan, Q.Y. Chen, S.Y. Zhang, Y.M. Huang, Q. Zhang, *Front. Phys.*, **8**, 631925 (2021). DOI: 10.3389/fphy.2020.631925
- [7] P. Schygulla, R. Müller, D. Lackner, O. Höhn, H. Hauser, B. Bläsi, F. Predan, J. Benick, M. Hermle, S. Glunz, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **30**, 869 (2022). DOI: 10.1002/pip.3503
- [8] P. Schygulla, R. Müller, O. Höhn, M. Schachtner, D. Chojniak, A. Cordaro, S. Tabernig, B. Bläsi, A. Polman, G. Siefer, D. Lackner, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **33** (1), 100 (2025). DOI: 10.1002/pip.3769
- [9] С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, М.В. Нахимович, В.В. Олейник, Р.А. Салий, А.Ф. Скачков, Л.Н. Скачкова, М.З. Шварц, Письма в ЖТФ, **51** (13), 40 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.13.60703.20295
[S.A. Mintairov, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Nakhimovich, V.V. Oleynik, R.A. Salii, A.F. Skachkov, L.N. Skachkova, M.Z. Shvarts, Tech. Phys. Lett., **51** (7), 37 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.07.61428.20295].
- [10] С.А. Минтаиров, В.М. Андреев, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, Н.К. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов, ФТП, **44** (8), 1118 (2010). [S.A. Mintairov, V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov, Semiconductors, **44** (8), 1084 (2010). DOI: 10.1134/S1063782610080233].