

УДК 537.312.52 : 621.315.592.3

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО КПД ТРЕХКОНТАКТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ GaAs НА Si

Д. О. Кузнецов, Е. Г. Тишковский, Д. М. Леган

Учреждение Российской академии наук

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

E-mail: diokuz@thermo.isp.nsc.ru

Методами численного моделирования в диффузионно-дрейфовом приближении рассчитан КПД трёхконтактного солнечного элемента на основе структуры GaAs на Si. Получены зависимости КПД от толщины слоя GaAs и плотности прорастающих в этом слое дислокаций, известным образом влияющих на время жизни неравновесных носителей заряда. Показано, что предельный КПД (27 %) такой структуры достигается при толщине слоя GaAs порядка 1,4 мкм и плотности прорастающих дислокаций менее 10^6 см^{-2} .

Ключевые слова: предельный КПД, солнечный элемент, гетероструктуры GaAs на Si.

Введение. Предельный КПД Si и GaAs солнечных элементов в настоящее время практически получен. Теоретически для монокристаллического Si предельный КПД может достигать 31 % [1], в то время как экспериментальный результат составляет 27,6 % [2]. Для GaAs эти величины равны 31 и 29 % [3] соответственно.

Один из вариантов увеличения эффективности преобразования солнечного излучения с помощью полупроводниковых материалов — использование нескольких материалов с разной шириной запрещённой зоны в одной структуре. Многокаскадный солнечный элемент представляет собой набор последовательно соединённых слоёв полупроводниковых материалов, каждый с определённой шириной запрещённой зоны, селективно реагирующий на соответствующий диапазон солнечного спектра. Соединение между слоями обеспечивается туннельными p - n -переходами. Теоретически предельный КПД многокаскадного солнечного элемента может составлять 86 % (для бесконечного числа слоёв) [4], однако его достижению мешает ряд принципиальных трудностей.

Во-первых, с увеличением количества слоёв резко возрастает технологическая сложность реализации такого элемента. Во-вторых, по мере увеличения количества последовательно соединённых слоёв снижается общий ток на выходе, поскольку он задаётся наименьшим из токов всех слоёв, взятых в отдельности. Так как ток в каждом слое генерируется потоком фотонов определённого спектрального диапазона, то чем больше слоёв, тем уже эти диапазоны и тем вероятнее, что хотя бы в одном из диапазонов мощность потока будет существенно ниже среднего значения. Очевидно, что эффективное использование многокаскадных солнечных элементов такой конфигурации в земных условиях затруднено.

В двухкаскадных элементах с тремя контактами не требуется согласование по току или напряжению между слоями. В них оба слоя соединены только с контактами. Один из контактов является общим. Исчезает необходимость создания туннельного перехода на границе между слоями.

Качество эпитаксиально выращиваемых плёнок GaAs на подложке Si достигло уровня, когда эти плёнки можно использовать для формирования трёхконтактных солнечных элементов с суммарным КПД более 19 % [5]. Среднее время жизни генерированных носителей — один из основных параметров, определяющих качество полупроводникового солнечного элемента. При эпитаксиальном сопряжении различных полупроводников неизбежно

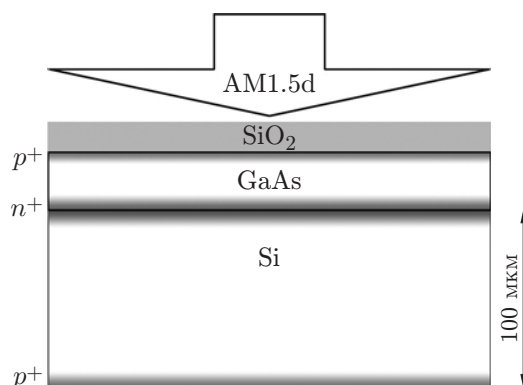


Рис. 1. Схема солнечного элемента на основе эпитаксиального слоя GaAs на Si

появление дислокаций несоответствия, рекомбинационные свойства которых приводят к уменьшению времени жизни.

Целью данной работы является расчёт предельного КПД солнечного элемента на основе гетероструктуры GaAs на Si с учётом рекомбинации на дислокациях несоответствия.

Параметры и условия моделирования. Моделировался трёхконтактный солнечный элемент на основе гетероструктуры GaAs на Si (рис. 1). Структура элемента представляет собой Si-подложку *p*-типа проводимости с уровнем легирования акцепторной примесью $C_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 100 мкм. На эту подложку нанесён слой GaAs, толщина которого варьировалась в пределах от 0,3 до 50 мкм. Отрицательный контакт (*n*-тип) размещён на границе Si и GaAs и является общим. Положительные контакты (*p*-тип) находятся на противоположных границах слоёв Si и GaAs. Контакты оптически неактивны, т. е. их влияние на распространение излучения не учитывалось. На слое GaAs расположен просветляющий слой SiO₂ толщиной 0,11 мкм.

Поглощение рассчитывалось в одномерном приближении методом переходной матрицы с учётом спектральных зависимостей комплексного показателя преломления каждого из материалов. За основу взят солнечный спектр AM1.5d с нормальным направлением к слою GaAs. Интегральная мощность излучения составила 10 Вт/см² (100 Солнц).

Максимальное значение среднего времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии было ограничено временем захвата на глубокие уровни по механизму Шокли — Рида и принято равным 10⁻³ с. Темп излучательной рекомбинации в кремнии был строго равен нулю.

Время жизни в объёме арсенида галлия менялось в зависимости от плотности прорастающих дислокаций в соответствии с экспериментальными данными, обобщёнными в работе [6]. Максимальное значение ограничено величиной 10⁻⁸ с.

В областях Si и GaAs учитывался механизм рекомбинации Оже. Поверхностная рекомбинация не учитывалась.

Для расчёта токов использовано диффузионно-дрейфовое приближение уравнений непрерывности, решавшихся совместно с уравнением Пуассона.

Модельный расчёт. Рассчитана зависимость КПД солнечного элемента от толщины эпитаксиального слоя GaAs и от плотности прорастающих в этом слое дислокаций (рис. 2). При этом учитывалось влияние плотности дислокаций только на время жизни неравновесных носителей заряда. Каждый раз независимо рассчитывалась вольт-амперная характеристика слоя GaAs и слоя Si, находились точки максимальных мощностей. КПД обоих слоёв складывались в суммарный КПД солнечного элемента.

Для максимального времени жизни неравновесных носителей в слое GaAs, когда плотность прорастающих в этом слое дислокаций стремится к нулю, наиболее оптимальная

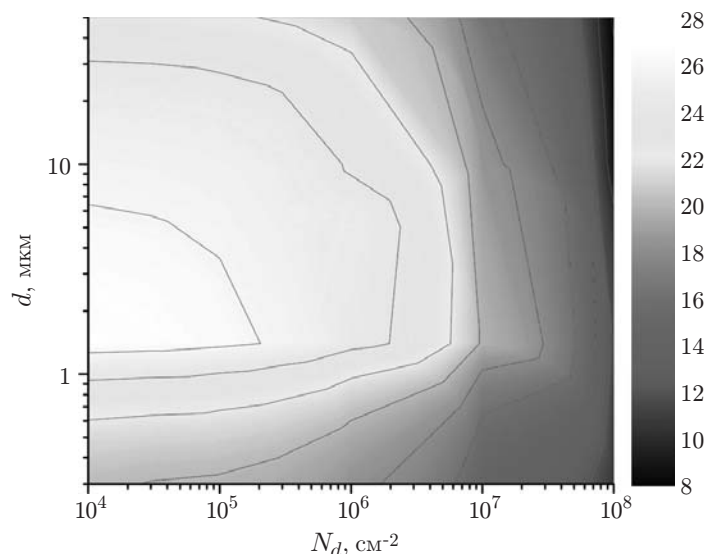


Рис. 2. Двумерная поверхность, характеризующая суммарный КПД солнечного элемента в координатах плотности прорастающих дислокаций N_d в слое GaAs и толщины d этого слоя

толщина данного слоя составила 1,4 мкм. Увеличение толщины слоя GaAs приводило к росту рекомбинационного тока, что в целом снижало ток короткого замыкания и КПД слоя GaAs. При меньших толщинах существенно уменьшалась доля поглощённых в слое GaAs фотонов преимущественно с энергиями в диапазоне 1,4–1,7 эВ, что также вело к уменьшению вклада слоя GaAs в ток короткого замыкания. При этом возрастал ток короткого замыкания и КПД слоя Si. Однако из-за меньшей ширины запрещённой зоны и эффективности преобразования фотонов данных энергий в Si суммарный КПД уменьшался.

КПД солнечного элемента уменьшался с увеличением плотности прорастающих дислокаций для любой толщины слоя GaAs. При плотности $N_d < 10^6 \text{ см}^{-2}$ это уменьшение незначительно, при $10^6 < N_d < 10^8 \text{ см}^{-2}$ — в несколько раз, при $N_d > 10^8 \text{ см}^{-2}$ — до величин менее 10 %, причём вклад слоя GaAs в суммарный КПД составлял менее 1 % при толщине этого слоя более 0,3 мкм.

Применение просветляющего покрытия SiO₂ снижает долю отражённых фотонов рабочего спектра (1,12–∞ эВ) до величины порядка 10 % от общего числа фотонов. При использовании многослойных просветляющих покрытий стоит ожидать увеличения КПД вплоть до величины 29,7 %, пропорционального увеличению доли поглощённых фотонов.

Заключение. В данной работе методами численного моделирования показано, что предельный КПД трёхконтактного солнечного элемента (в отсутствие дислокаций) на основе эпитаксиальной плёнки GaAs на Si при мощности падающего излучения 10 Вт/см² и использовании однослойного просветляющего покрытия SiO₂ составляет 27 %. К этому значению позволит приблизиться лишь технология, обеспечивающая плотность дислокаций несоответствия на уровне $N_d < 10^6 \text{ см}^{-2}$. При уровне технологии, характеризуемом $N_d > 10^7 \text{ см}^{-2}$, КПД будет ограничен величиной 15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shockley W., Queisser H. J. Detailed balance limit of efficiency of p - n junction solar cells // Journ. Appl. Phys. 1961. **32**, N 3. P. 510–519.

-
2. **Slade A., Garboushian V.** 27.6 % efficient silicon concentrator solar cells for mass production // Proc. of the 15th Intern. Photovoltaic Science and Engineering Conf. Shanghai, 2005. P. 701–703.
 3. **Kaminar N. R., Liu D. D., MacMillan H. F. et al.** Concentrator efficiencies of 29.2 % for a GaAs cell and 24.8 % for a mounted cell-lens assembly // 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. Las Vegas, 1988. P. 766–768.
 4. **De Vos A.** Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells // Journ. Phys. D: Appl. Phys. 1980. **13**. P. 839–846.
 5. **Soga T., Mingju Y., Takashi J. et al.** High-efficiency monolithic three-terminal GaAs/Si tandem solar cells fabricated by MCVD // Jap. Journ. Appl. Phys. 1996. **35**, Pt. 1, N 2B. P. 1401–1404.
 6. **Yamaguchi M., Amano Ch.** Efficiency calculations of thin-film GaAs solar cells on Si substrates // Journ. Appl. Phys. 1985. **58**. P. 3601–3616.

Поступила в редакцию 15 июля 2011 г.
