

07.2;07.3;08.3;09.1;13.1;13.4

Увеличение коэффициента полезного действия фотопреобразователей лазерного излучения диапазона 520–540 nm на основе гетероструктур GaInP/GaAs

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 8 декабря 2020 г.

Принято к публикации 8 декабря 2020 г.

Исследованы фотопреобразователи лазерного излучения для диапазона 520–540 nm на основе гетероструктур GaInP/GaAs. Показано, что уменьшение степени упорядочения в слоях GaInP за счет введения атомов сурьмы приводит к коротковолновому сдвигу края поглощения с одновременным увеличением напряжения холостого хода, а увеличение общей толщины фотоактивных слоев фотопреобразователей лазерного излучения выражается в повышении спектральной чувствительности. Проведенная оптимизация позволяет повысить коэффициент полезного действия фотопреобразователей лазерного излучения с 39.4 до 44.4%.

Ключевые слова: фотопреобразователь лазерного излучения, КПД, спектральная чувствительность, напряжение холостого хода, газофазная эпитаксия.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.06.50755.18619

В последнее время задача передачи энергии на расстояние посредством лазерного луча становится все более актуальной и находит целый ряд практических приложений, таких как создание автономных беспилотных летательных аппаратов, снабжение энергией космических летательных аппаратов, развитие технологии Power-over-Fiber для передачи мощности с использованием оптоволоконного кабеля, дистанционное энергообеспечение подкожных датчиков или преобразователей и др.

Для подзарядки летательных аппаратов на небольших расстояниях удобно использовать лазерное излучение (ЛИ) видимого диапазона. Для этого оптимально подходят эффективные и мощные твердотельные лазеры на основе иттриевого граната с длиной волны второй гармоники 532 nm. В настоящее время достигнуты высокие значения КПД фотопреобразователей (ФП) ЛИ для диапазона длин волн 800–1600 nm, однако ФП для видимого диапазона спектра исследованы незначительно.

Для длин волн диапазона 810–830 nm используются ФП на основе твердых растворов AlGaAs, выращиваемые на подложках GaAs, которые наиболее широко исследованы. КПД таких структур наиболее высок и достигает 55–60% [1,2]. В качестве ФП на длину волны 1064 nm были предложены кремниевые структуры, при этом продемонстрирована эффективность преобразования 38.8% [3]. Кроме того, разработаны метаморфные структуры на основе InGaAs, выращиваемые на подложке GaAs с использованием метаморфного буфера, и продемонстрирован КПД более 50% [4]. Основными материалами для создания ФП лазерного излучения спектрального диапазона 1.3–1.5 μm являются InGaAs, согласованный с подложкой InP, а также GaSb. Использо-

вание ФП InGaAs/InP позволило продемонстрировать эффективность преобразования $\sim 45\%$ на длине волны 1.55 μm [5]. ФП на основе GaSb также продемонстрировали эффективность преобразования в 45% [6].

Оптимальным для преобразования лазерного излучения видимого диапазона является использование твердых растворов AlGaInP, согласованных по параметру решетки с GaAs. Ширина запрещенной зоны GaInP составляет 1.9 eV, что соответствует красной области спектра. Такие ФП могут эффективно преобразовывать ЛИ красной, зеленой и синей областей спектра. Однако они мало исследованы на данный момент, а наибольший продемонстрированный КПД [7] не превышает 40% (длина волны 520 nm).

В настоящей работе представлены результаты оптимизации ФП на основе GaInP для ЛИ диапазона длин волн 520–540 nm. Характерной особенностью твердых растворов GaInP является упорядочение атомов галлия и индия в подрешетке III группы [8,9]. Эффект объемного упорядочения приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны полупроводника и снижению изотропии материала. Применение изовалентного легирования GaInP атомами V группы позволяет уменьшить степень упорядочения и повысить ширину запрещенной зоны материала, что должно выражаться в повышении генерируемого ФП напряжения.

Структуры ФП выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в реакторе при пониженном давлении (100 mbar) на подложках p-GaAs (100) с использованием триметилгаллия, триметилиндия и триметилалюминия в качестве источников атомов III группы, арсина и фосфина в качестве источников атомов V группы, а также диэтилцинка

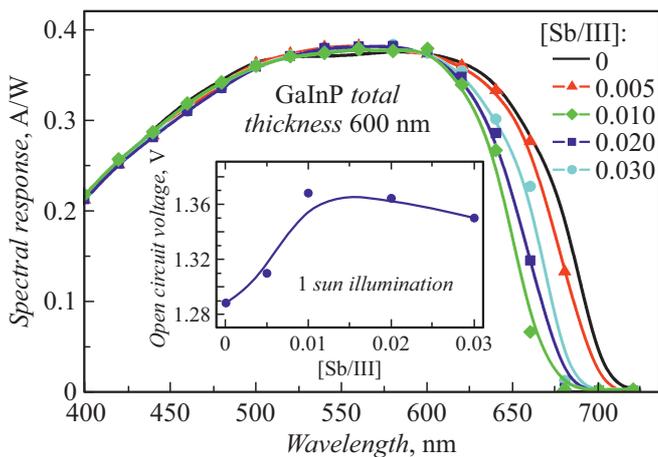


Рис. 1. Спектральная чувствительность ФП на основе GaInP с толщиной базового слоя 550 nm при различном соотношении атомов сурьмы и атомов III группы в газовой фазе [Sb/III]. На вставке представлена зависимость напряжения холостого хода ФП от соотношения [Sb/III].

и силана в качестве источников акцепторной и донорной примеси соответственно. Структуры содержали эпитаксиальные слои в следующей последовательности: тыльный потенциальный барьер $p\text{-AlGaInP}$ толщиной 100 nm, базовый слой $p\text{-GaInP}$ толщиной 350–950 nm, эмиттерный слой $n\text{-GaInP}$ толщиной 50 nm, слой $n\text{-AlInP}$ широкозонного окна толщиной 30 nm, а также контактный слой $n^{++}\text{-GaAs}$. Для уменьшения степени упорядочения в слои GaInP добавлялись атомы сурьмы с использованием триметилсурьмы в качестве источника. Из выращенных структур были изготовлены фотодиоды по упрощенной технологии, позволяющие проводить измерения спектральной чувствительности и напряжения холостого хода. Для этого на лицевую и тыльную стороны эпитаксиальных гетероструктур электрохимически осаждались контакты из никеля, а в области, не закрытой никелевым контактом, производилось химическое травление контактного слоя.

На рис. 1 представлены зависимости спектральной чувствительности от длины волны для ФП лазерного излучения с толщиной базы 550 nm, выращенных при различном соотношении мольного потока атомов сурьмы к мольному потоку атомов III группы [Sb/III] в газовой фазе. При добавлении 0.5% сурьмы происходит коротковолновый сдвиг края fotocувствительности ФП, связанный с уменьшением степени упорядочения в твердом растворе GaInP. При этом напряжение, генерируемое ФП, возрастает (вставка к рис. 1), что связано с увеличением ширины запрещенной зоны разупорядоченного твердого раствора GaInP. Увеличение соотношения [Sb/III] до 1% обеспечивает наибольший сдвиг края поглощения и прирост напряжения ФП в 80 mV. Дальнейшее увеличение количества атомов сурьмы приводит к уменьшению генерируемого напряжения, что связано с „разбавлением“ твердого раствора GaInP

атомами сурьмы, выражающимся в уменьшении ширины запрещенной зоны. При этом для всех исследованных образцов уровень спектральной чувствительности в диапазоне 500–600 nm практически не зависит от введения атомов сурьмы и составляет порядка 375 mA/W.

Увеличение толщины базового слоя $p\text{-GaInP}$ приводит к росту спектральной чувствительности в диапазоне 500–600 nm (рис. 2), а также к дополнительному возрастанию напряжения холостого хода ФП (вставка к рис. 2). При этом в диапазоне 520–540 nm насыщение роста спектральной чувствительности происходит при общей толщине фотоактивных слоев GaInP 800 nm.

Таким образом, проведенная оптимизация позволила повысить как уровень спектральной чувствительности, так и генерируемое ФП напряжение. Для оценки увеличения КПД ФП ЛИ нами был доработан аналитический метод, разработанный ранее для солнечных элементов [10]. КПД ФП ЛИ может быть записан в следующем виде:

$$\eta = V_{oc} \cdot SR \cdot FF, \quad (1)$$

где V_{oc} — напряжение холостого хода, SR — спектральная чувствительность, FF — фактор заполнения вольт-амперной характеристики. Таким образом, КПД прямо пропорционален генерируемому напряжению и спектральной чувствительности. Имея реферный ФП ЛИ с известными параметрами, можно аналитически оценить влияние оптимизации на его КПД с использованием выражения

$$\eta = \eta^{Ref} \frac{(V_{oc}^{Ref} + \Delta V_{oc})(SR^{Ref} + \Delta SR)}{V_{oc}^{Ref} SR^{Ref}}, \quad (2)$$

где η^{Ref} , V_{oc}^{Ref} , SR^{Ref} — параметры реферного ФП, ΔV_{oc} , ΔSR — увеличение напряжения и спектральной чувствительности за счет оптимизации. Необходимо отметить, что данный подход является приближенным, так

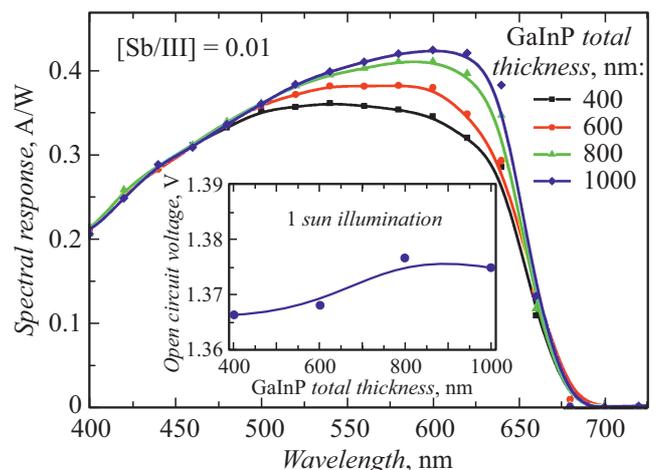


Рис. 2. Спектральная чувствительности ФП на основе GaInP при соотношении атомов сурьмы и атомов III группы в газовой фазе [Sb/III]=0.01 и различной толщине базового слоя. На вставке представлена зависимость напряжения холостого хода ФП от общей толщины фотоактивных GaInP-слоев.

Аппроксимация КПД фотопреобразователя лазерного излучения длин волн 520–540 nm на основе оптимизированных структур GaInP/GaAs

Толщина GaInP, nm	[Sb/III], %	SR, mA/W	V_{oc} , V	ΔSR , mA/W	ΔV_{oc} , mV	КПД, %
600	0	370	1.288	0	0	39.4
600	0.5	378	1.31	7.3	22	40.9
600	1	375	1.368	4.3	80	42.4
600	2	376	1.364	5.3	76	42.4
600	3	376	1.35	5.3	62	42.0
400	1	375	1.366	-14.5	78	40.1
800	1	389	1.377	18.3	89	44.4
1000	1	390	1.373	19.3	85	44.3

как не учитывает возможное изменение FF . Однако демонстрируемое увеличение напряжения ФП, всегда выражающееся в увеличении FF , позволяет заключить, что данная оценка будет давать заниженные значения КПД.

Для оценки увеличения КПД за счет проведенной оптимизации были использованы параметры ФП ЛИ с КПД 39.4% [7], генерирующего напряжение 1.26 V и имеющего спектральную чувствительность 0.35 A/W в диапазоне 520–540 nm. Проведенная аппроксимация (см. таблицу) показала, что введение атомов сурьмы, а также увеличение толщины приводят к увеличению эффективности преобразования ФП ЛИ на основе GaInP. При этом ФП с общей толщиной фотоактивных слоев 800 nm, выращенный при соотношении [Sb/III]=0.01, демонстрирует прирост КПД с 39.4 до 44.4%.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-00868 А).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Oliva, F. Dimroth, A.W. Bett, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **16**, 289 (2008). <https://doi.org/10.1002/rip.811>.
- [2] В.П. Хвостиков, Н.А. Калужный, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, В.М. Емельянов, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев, ФТП, **50** (9), 1242 (2016). [Пер. версия: 10.1134/S1063782616090128].
- [3] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham, IEEE Electron Dev. Lett., **13**, 317 (1992). <https://doi.org/10.1109/55.145070>
- [4] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Sali, M.Z. Shvarts, Solar Energy Mater. Solar Cells, **217**, 110710 (2020). <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110710>

- [5] J. Mukherjee, S. Jarvis, M. Perren, S.J. Sweeney, J. Phys. D, **46**, 264006 (2013). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/26/264006>
- [6] V. Andreev, V. Khvostikov, V. Kalinovsky, V. Lantratov, V. Grilikhes, V. Romyantsev, M. Shvarts, V. Fokanov, A. Pavlov, in Proc. 3rd World Conf. on photovoltaic energy conversion (Tokyo, 2003), vol. A, p. 761.
- [7] R. Jomen, F. Tanaka, T. Akiba, M. Ikeda, K. Kiryu, M. Matsushita, H. Maenaka, S. Lu, S. Uchida, Jpn. J. Appl. Phys., **57**, 08RD12 (2018). <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08RD12>
- [8] A. Gomyo, T. Suzuki, S. Kawata, I. Hino, T. Yuasa, Appl. Phys. Lett., **50**, 673 (1987). <https://doi.org/10.1063/1.98062>
- [9] A. Mascarenhas, S. Kurtz, A. Kibbler, J.M. Olson, Phys. Rev. Lett., **63**, 2108 (1989). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.2108>
- [10] S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, A.E. Zhukov, Semicond. Sci. Technol., **32**, 015006 (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-6641/32/1/015006>