

Проблема неединственности преобразования лазерного излучения в электрический ток в многопереходных монокристаллических фотопреобразователях

© И.А. Толкачев, В.С. Юферев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: valyuf@ammp3.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 27 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 24 июля 2024 г.

Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Исследуется множественность решений монокристаллического двухпереходного фотопреобразователя лазерного излучения, в структуре которого имеется окно и тыльный барьер, а также ловушки в туннельном диоде. Показано существование двух решений, одно из которых соответствует туннельной ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода, а второе — диффузной. Показано также, что при наличии ловушек перенос носителей заряда через барьер туннельного диода происходит посредством туннелирования в обоих решениях. При этом во втором решении туннелирование имеет место даже в режиме холостого хода, когда носители заряда движутся в одну сторону. Предложен способ реализации второго решения на практике.

Ключевые слова: фотовольтаика, лазерное излучение, многопереходный фотопреобразователь, туннельный диод, ловушки.

DOI: 10.61011/FTP.2024.10.59382.6453A

1. Введение

Монокристаллические многопереходные фотопреобразователи (МФП) лазерного излучения, состоящие из нескольких однопереходных ФП (субпреобразователей или каскадов преобразования), которые расположены друг над другом и соединены последовательно посредством встречно включенных туннельных диодов (ТД), оказываются весьма привлекательными для использования в оптических системах беспроводной передачи энергии и информационных сигналах, а также в различных радиофотонных устройствах (см., например, [1]), поскольку позволяют многократно увеличить по сравнению с однопереходными ФП выходное напряжение при сохранении высокой эффективности преобразования оптической мощности в электрическую. В частности, для нормально работающего МФП величина напряжения холостого хода U_{oc} практически равна сумме U_{oc} всех, входящих в МФП однопереходных ФП. В зарубежной литературе приводятся результаты численных и экспериментальных исследований МФП, содержащих от 2 до 20 $p-n$ -переходов [2–7]. С другой стороны, туннельные диоды, которые входят в состав МФП, обладают N -образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Поэтому если ток через ТД меньше величины пикового тока, то туннельный диод имеет два устойчивых равновесных состояния. Естественно ожидать, что при этом же условии для одного и того же МФП также возможно существование нескольких вариантов преобразования излучения в электрический ток. Максимальное число таких вариантов в принципе может достигать 2^M , где M — количество туннельных диодов. При этом лишь в одном

из вариантов (назовем его первым) режим протекания тока соответствует туннельной ветви ВАХ во всех ТД. Во всех же остальных случаях, как минимум в одном ТД, ток будет соответствовать диффузионной ветви ВАХ и, следовательно, напряжение, падающее на нем, окажется существенно выше (для системы AlGaAs ~ 1 В), что будет приводить к снижению эффективности преобразования. На практике обычно реализуется первый вариант. Возможно, поэтому в литературе данному вопросу до сих пор не было уделено должного внимания. Необходимо заметить, что моделирование МФП с числом ТД больше одного сталкивается с большими вычислительными трудностями, что, по-видимому, непосредственно связано с указанной многозначностью режимов функционирования МФП. По этой причине в подобных случаях ТД обычно заменяются омической связью. Однако при таком подходе можно успешно моделировать лишь первый режим, в то время как все остальные решения исключаются из рассмотрения. По-видимому, впервые данная проблема была рассмотрена в работе [8] на примере простейшей структуры ($p-n$ -ТД- $p-n$) двухкаскадного ФП на основе арсенида галлия. Было показано, что кроме известной нагрузочной характеристики, соответствующей процессу туннелирования носителей заряда через барьер ТД, существует вторая нагрузочная характеристика, связанная с инжекцией носителей заряда через этот барьер в результате его значительного понижения. Однако возникает вопрос, а не связано ли появление второго решения с простотой рассмотренной структуры ФП, которая не содержала ни окна, ни тыльного барьера, ни ловушек, т.е. тех факторов, которые характерны для реальных ФП.

Структура двухкаскадного фотопреобразователя с широкозонным окном и тыльным потенциальным барьером

Материал	Концентрация доноров $N_D, \text{см}^{-3}$	Концентрация акцепторов $N_A, \text{см}^{-3}$	Толщина слоя $h, \text{мкм}$
$p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}, x=0.3$	—	$2 \cdot 10^{19}$	0.04
$p\text{-GaAs}$	—	$2 \cdot 10^{18}$	0.2
$n\text{-GaAs}$	$5 \cdot 10^{17}$	—	0.42
$n^{++}\text{-GaAs}$	$2 \cdot 10^{19}$	—	0.025
$p^{++}\text{-GaAs}$	—	$6 \cdot 10^{19}$	0.025
$p\text{-GaAs}$	—	$2 \cdot 10^{18}$	0.4
$n\text{-GaAs}$	$5 \cdot 10^{17}$	—	1.926
$n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}, x=0.3$	$3 \cdot 10^{18}$	—	0.025
$n\text{-GaAs}$	$3 \cdot 10^{18}$	—	0.05

Поэтому цель настоящей работы состояла в исследовании влияния указанных факторов на проблему неединственности преобразования лазерного излучения в МФП. Постановка задачи аналогична изложенной в работе [8].

2. Двухпереходный ФП

Снова рассматривается двухпереходный ФП, однако структура его существенно ближе к реальной: имеется широкозонное окно, тыльный барьер и ловушки в туннельном диоде. Параметры структуры приведены в таблице. Межзонное туннелирование было дополнено туннелированием через ловушки, чья энергия составляла 0.4 эВ относительно E_c или E_v . Сам процесс туннелирования учитывался путем введения дополнительного рекомбинационного члена в диффузионно-дрейфовые уравнения согласно нелокальной модели [9]. Эффективные массы электронов и дырок для туннелирования были практически равны стандартным значениям соответствующих масс, в результате чего плотность пикового тока ТД была ограничена величиной 32 А/см^2 . Излучение вводилось слева, а количество фотонов, поглощенных в каждом субпреобразователе (СУБПР), было одинаковым.

3. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены нагрузочные кривые при мощности излучения 100 Вт/см^2 (когда ток меньше пикового тока ТД) и различных концентрациях ловушек. Видно, что, несмотря на усложнение структуры по сравнению с [8], во всех случаях имеется два решения. На первое решение, описываемое кривой 1, ловушки влияния не оказывают, а второе решение уже существенно зависит от их концентрации. Ток короткого замыкания J_{sc} во втором решении несколько больше, чем в первом, а напряжение холостого хода U_{oc} существенно меньше. При этом U_{oc} возрастает с ростом N_{trap} , однако это

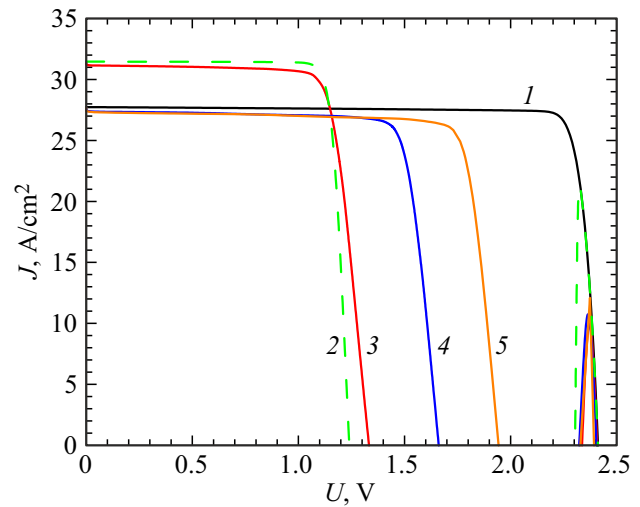


Рис. 1. Нагрузочные кривые для разных решений (режим работы ФП). 1 — первое решение, 2–5 — второе решение при различных концентрациях ловушек: $N_{trap} = 0$ (2), 10^{14} (3), 10^{15} (4), 10^{16} см^{-3} (5). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

сопровождается уменьшением фактора, так что эффективность преобразования существенно не меняется и остается значительно меньшей, чем в первом решении. Интересно отметить, что в окрестности напряжения холостого хода для первого решения (кривая 1) второе решение появляется снова и полностью совпадает с первым решением. Однако максимальное значение тока второго решения оказывается существенно меньше тока первого решения, так что и на этом участке эффективность преобразования второго решения оказывается меньше. Отметим, что в исходном состоянии (без излучения и приложенного напряжения) контактные разности потенциалов на p-n-переходах были равны 1.35 В для обоих СУБПР и 1.9 В для ТД. При освещении ФП происходит перераспределение потенциала по толщине структуры из-за рассогласования токов вследствие различия в толщине каскадов (рис. 2). В режиме короткого замыкания в первом решении первый СУБПР (ближний к освещаемой поверхности) смещается на +1.05 В в прямом направлении, второй на –1.03 В в обратном, в то время как ТД всего на 0.02 В, что соответствует туннельной ветви его ВАХ. Во втором решении картина кардинально меняется и туннельный диод сильно смещается в положительном направлении, переходя на диффузную ветвь ВАХ. Интересно отметить, что величина смещения лишь незначительно убывает (в пределах 3–10%) с ростом напряжения на ФП вплоть до напряжения U_{oc} . При $N_{trap} = 0$ это смещение равно 1.24 В и практически полностью компенсируется положительным смещением p-n-перехода во втором каскаде при всех значениях напряжения на ФП вплоть до U_{oc} . Последнее означает [8], что генерируемые во втором СУБПР носители заряда не вносят вклад в электрический ток, что и объясняет

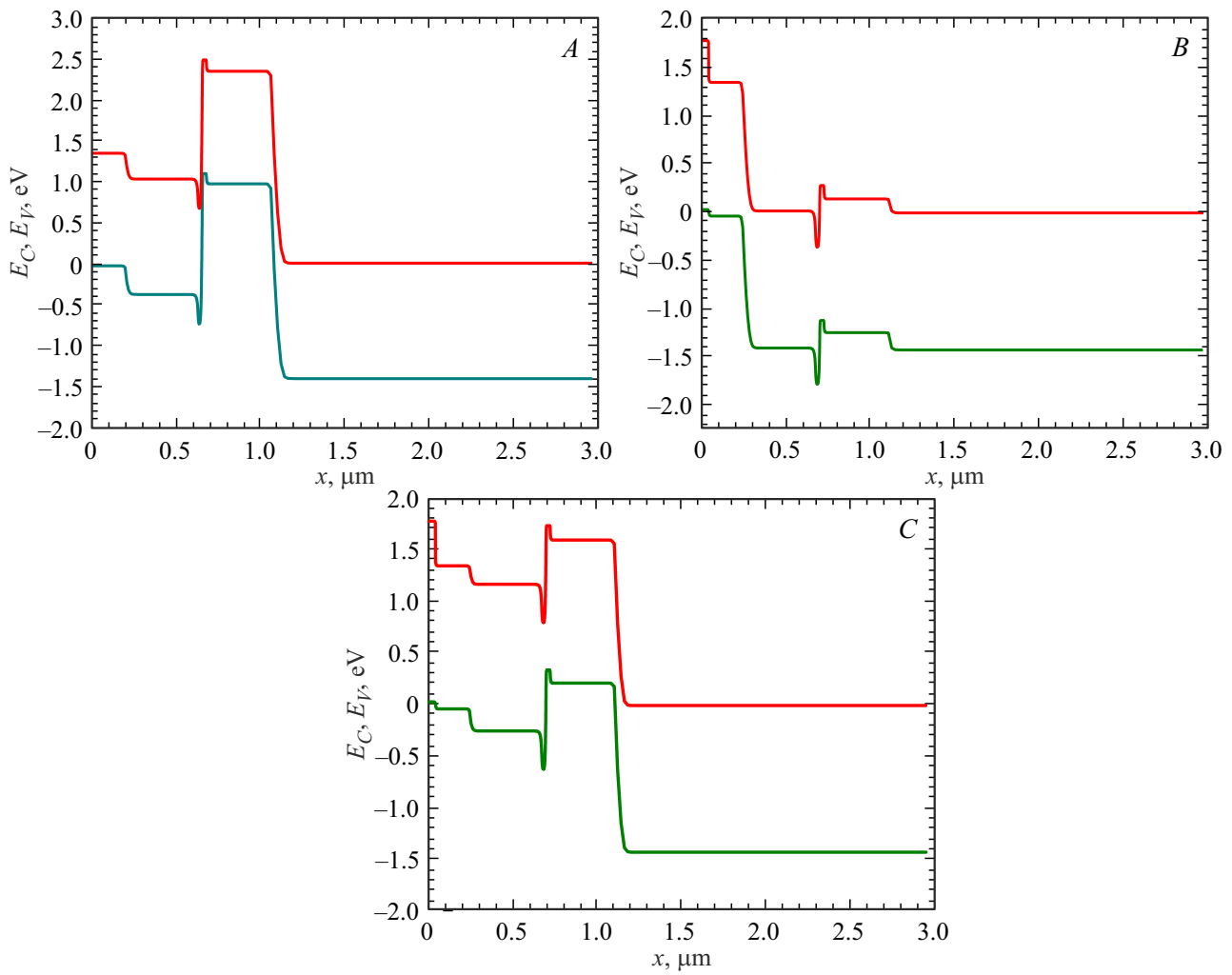


Рис. 2. Зонные диаграммы двухпереходного ФП в режиме короткого замыкания. *A* — первое решение, *B* и *C* — второе решение при $N_{\text{trap}} = 0$ и $N_{\text{trap}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

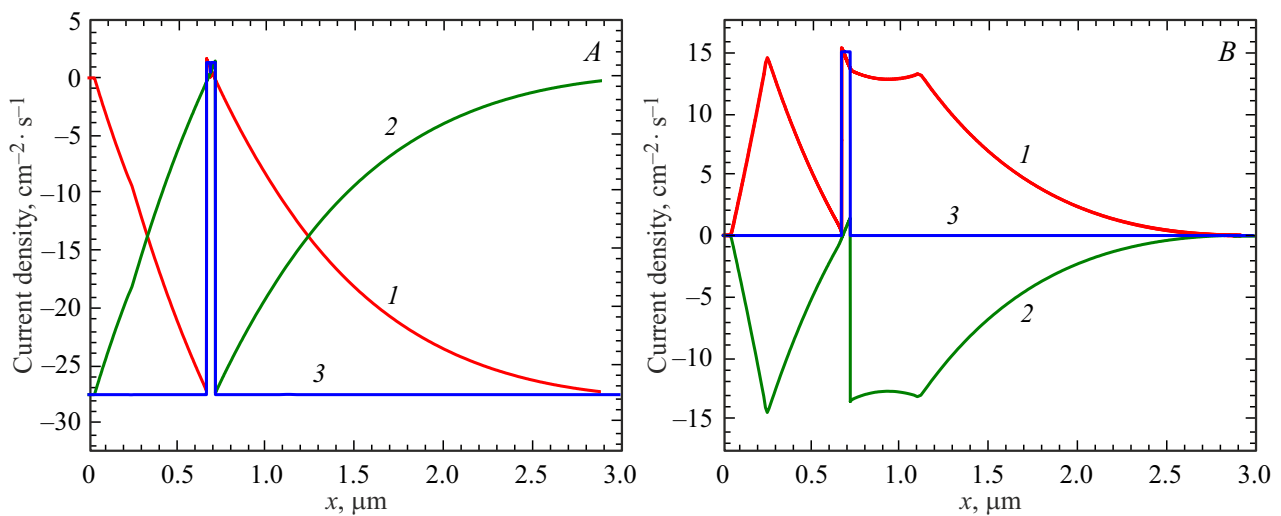


Рис. 3. Распределение плотности электронного (*1*) и дырочного токов (*2*) по толщине ФП во втором решении при $N_{\text{trap}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в режиме короткого замыкания (*A*) и холостого хода (*B*). Кривая *3* — плотность полного тока.

вдвое меньшее значение U_{oc} на рис. 1 (кривая 2). С ростом концентрации ловушек смещение ТД уменьшается (например, для $N_{trap} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в режиме короткого замыкания оно равно 0.86 В) и зонная диаграмма становится качественно более похожей на зонную диаграмму первого решения (рис. 2, *a-c*). На рис. 3 показаны распределения электронного и дырочного токов по толщине структуры для второго решения при $N_{trap} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Видно, что перенос носителей заряда через барьер ТД осуществляется по-прежнему туннелированием (но уже через ловушки) при всех напряжениях, для которых существует фотовольтаический режим, хотя на ТД падает значительное напряжение ~ 0.8 В. Особый интерес вызывают электронные и дырочные токи в режиме холостого хода (рис. 3, *b*), которые оказываются весьма значительными, хотя полный ток равен нулю. Так как указанные токи имеют разные знаки, электроны и дырки движутся в одном направлении влево к освещаемой поверхности. При этом в ТД происходит скачкообразное падение этих токов до нуля, как это имеет место, например, в режиме короткого замыкания (рис. 3, *a*). Возникает необычная ситуация, когда носители заряда, туннелирующие через барьер ТД, движутся в одну сторону. Объяснить это можно следующим образом. Для электронов, движущихся справа налево, $p-n$ -переход ТД не является барьером, и они скатываются из p -области ТД в n -область и уже оттуда туннелируют навстречу дыркам, которые тоже подходят к барьеру справа. Заметим, что при $N_{trap} = 0$ носители во втором решении, как и в работе [8], переносятся через барьер ТД инжекцией.

Как уже указывалось выше, в реальных МФП реализуется режим работы, описываемый первым решением. А как можно на практике проверить существование других решений. Применительно к двухпереходному ФП это можно сделать следующим образом. При достаточно большой мощности излучения ток превышает пиковое значение тока ТД и у нас имеется только одно второе решение. Если теперь резко уменьшить мощность излучения до уровня, когда ток снова станет меньше пикового тока ТД, то второе решение сохранится. Именно таким нестационарным путем были получены нагрузочные кривые 2–5 на рис. 1, поскольку из-за усложнения структуры ФП получить их обычным итерационным методом из стационарных уравнений нам не удалось. Это в свою очередь проясняет причину того, почему обычно на практике реализуется первое решение.

4. Заключение

Таким образом, показано, что усложнение конструкции двухпереходного ФП не приводит к исчезновению проблемы неединственности преобразования лазерного излучения. Имеются все основания полагать, что этот вывод будет справедлив и для МФП.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Yuferev, I.A. Tolkachev, V.S. Kalinovsky. *Techn. Phys. Lett.*, **50** (7), 39 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2024.01.56925.19674
- [2] D.F. Zaitsev, V.M. Andreev, I.A. Bilenko, A.A. Berezovsky, P.Yu. Vladislavsky, Yu.B. Gurfinkel, L.I. Tsvetkova, V.S. Kalinovsky, N.M. Kondratyev, V.N. Kosolobov, V.F. Kurochkin, S.O. Slipchenko, N.V. Smirnov, B.V. Yakovlev. *Radiotekhnika*, **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17 (in Russian)
- [3] Mark C.A. York, Simon Fafard. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **50**, 173003 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa60a6
- [4] E. Moon, M. Barrow, J. Lim, D. Blaauw, J.D. Phillips. *IEEE J. Photovoltaics*, **10**, 1721 (2020). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.3025450
- [5] S. Fafard, D.P. Masson. *J. Appl. Phys.*, **130**, 160901 (2021). DOI: 10.1063/5/0070860
- [6] H. Helmers, C. Armbruster, M. von Ravenstein, D. Derix, C. Schöner. *IEEE Trans. Power Electron.*, **35**, 7904 (2020). DOI: 10.1109/TPEL.2020.2967475
- [7] J. Huang, Y. Sun, Y. Zhao, S. Yu, J. Dong, J. Xue, C. Xue, J. Wang, Y. Lu, Y. Ding. *J. Semicond.*, **39** (4), 044003 (2018). DOI: 10.1088/1674-4926/39/9/094006
- [8] A. Wang, J. Yin, S. Yu, Y. Sun. *Appl. Phys. Lett.*, **121**, 233901 (2022). DOI: 10.1063/5.0109587
- [9] S. Fafard, F. Proulx, M.C.A. York, L.S. Richard, P.O. Provost, R. Ares, V. Amez, D.P. Masson. *Appl. Phys. Lett.*, **109**, 131107 (2016). DOI: 10.1063/1.4964120

Редактор Г.А. Оганесян

The problem of nonuniqueness of the laser radiation conversion into electric current in multijunction monolithic photoconverters

I.A. Tolkachev, V.S. Yuferev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract We study the multiplicity of solutions for a monolithic two-junction photoconverter of laser radiation, the structure of which has a window and a rear barrier, as well as traps in a tunnel diode. The existence of two solutions is shown, one of which corresponds to the tunnel branch of the current-voltage characteristic of the tunnel diode, and the second to the diffuse branch. It is also shown that, in the presence of traps, the transfer of charge carriers through the tunnel diode barrier occurs through tunneling in both solutions. Moreover, in the second solution, tunneling occurs even in the mode of the open-circuit voltage, when charge carriers move in one direction. A method for implementing the second solution in practice is proposed.