

Модель экзоионного фототранзистора

А. Г. Роках, А. А. Сердобинцев, М. И. Шишкин

На многослойной полупроводниково-диэлектрической структуре Cu(Al)-SiO-AlGaAs-GaAs-Cu(Al), используемой в качестве мишени масс-спектрометра, проведено физическое моделирование ионных процессов с помощью электронных процессов на модели. Получено лучшее понимание процессов управления выходом вторичных ионов из мишени с помощью света и электрического поля. Описаны электронные свойства мишени, рассматриваемой в качестве полевого фототранзистора с p-n-переходом. Освещение производилось с помощью галогенной лампы накаливания, а электрическое смещение при моделировании осуществлялось электрическим источником, имитирующим автоматическое смещение, создаваемое на мишени током бомбардирующих ионов. Возможность двойного управления выходом вторичных (экзо-) ионов расширяет функциональные возможности мишени, которую можно рассматривать в качестве экзоионного фототранзистора – нового прибора оптоионики.

Ключевые слова: вторично-ионный фотоэффект, полупроводниково-диэлектрическая структура, физическое (натурное) моделирование, экзоионный фототранзистор, оптоионика, вторичные ионы, эквивалентный электронный фототранзистор.

Введение

Обнаруженное относительно недавно влияние подсветки и схемы заземления мишени, например, масс-спектрометра, на изменение выхода вторичных ионов под действием света (т. н. вторично-ионный фотоэффект – ВИФЭ) открывает возможность контролировать ионное распыление мишени с помощью света [1–3] и электрического поля. Это позволяет расширить возможности оптоионики [4–6] в части управления потоком вторичных ионов, осуществляя двухпараметрическое управление массопереносом.

Целью данной работы являлось проведение физического моделирования ионных процессов с помощью электронных процессов на модели в виде многослойной полупроводниково-диэлектрической структуры Cu(Al)-SiO-AlGaAs-GaAs-Cu(Al), используемой в качестве мишени масс-спектрометра.

Исследуемые образцы и методика исследования

Исследуемая структура была образована металлческими, диэлектрическим и полупроводниковыми слоями: Cu(Al)-SiO-AlGaAs-GaAs-Cu(Al). Она в своей основе содержала эпитаксиальный слой арсенида галлия-алюминия на монокристаллической пластине арсениде галлия, используемый в приборах ночного видения. В статье представлено более полное, чем в работах [7, 8] исследование характеристик и параметров этой структуры, представляющей собой своего рода фототранзистор, в котором реализуется электронное управление выходом вторичных ионов в вакуум.

Полупроводниковые слои представлены структурой Al_{0,3}Ga_{0,7}As p-типа проводимости толщиной 500 нм с концентрацией $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и GaAs n-типа проводимости толщиной 400 нм с концентрацией 10^{17} см^{-3} . На структуру наносились металлические пленочные электроды напылением меди или алюминия: сплошной со стороны GaAs и в форме двух встречно-штыревых гребенок – на слой SiO, имевший толщину 90 нм.

В процессе моделирования структура исследовалась при наличии и отсутствии освещения в схеме с двумя источниками питания, при этом в качестве общего электрода использовали либо сплошной тыловой контакт, либо одну из «гребен-

Роках Александр Григорьевич, профессор, д.ф.-м.н.
 Сердобинцев Алексей Александрович, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Шишкин Михаил Игоревич, инженер.
 Саратовский государственный университет
 им. Н. Г. Чернышевского.
 Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83.
 Тел. 8 (8452) 52-27-05. E-mail: rokakhag@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 августа 2016 г.

© Роках А. Г., Сердобинцев А. А., Шишкин М. И., 2017

нок». В обоих случаях рассматривались две цепи: входная и выходная. Было обнаружено заметное влияние смещения условной входной цепи и освещения обеих цепей на сопротивление условной

выходной цепи. В процессах моделирования использовалась электронная и дырочная (не ионная) проводимость исследуемой структуры, схемы включения которой показаны на рис. 1, а, б.

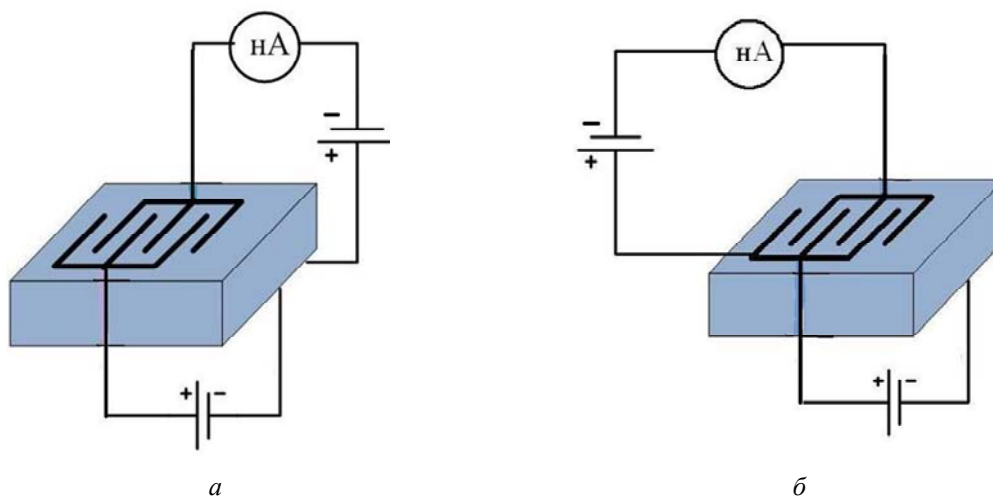


Рис. 1. Принципиальные схемы измерения вольт-амперных характеристик в цепи с общим тыловым электродом (а) и в цепи с «гребенкой» в качестве общего электрода (б). Вторичная цепь содержит наноамперметр.

При моделировании, которое осуществлялось на воздухе, а не в сверхвысоком вакууме (как в случае натурального эксперимента), для определения параметров данной структуры в режиме полевого фототранзистора заземлялся один из электродов гребенчатых контактов либо электрод тыловой поверхности (сплошной). Измерения (ввиду значительной величины фотоЭДС) проводились и в отсутствие освещения с целью показать взаимное влияние электрических цепей друг на друга.

Основные результаты

Бомбардировка первичными ионами аргона на масс-спектрометре Perkin-Elmer PHI SAM 4300 при периодически прерываемой подсветке от галогенной лампы накаливания с кварцевым баллоном показала, что выход вторичных ионов при спектральной подсветке существенно изменялся при изменении схемы заземления электродов (рис. 2 а, б). Длительность каждого импульса освещения и интервала между последующим импульсом составляли 1 минуту.

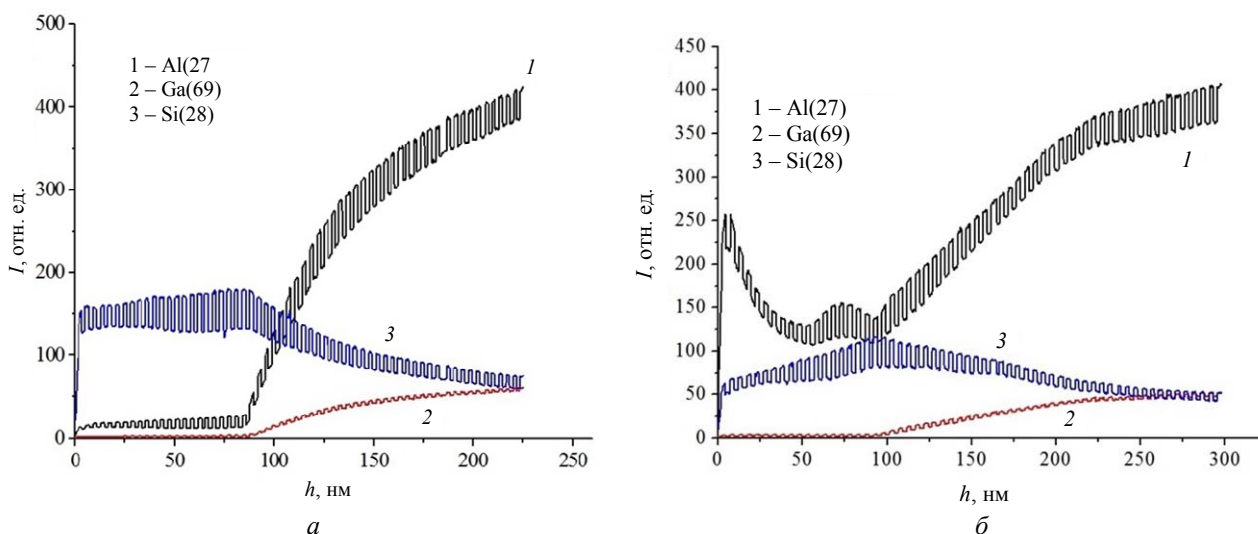


Рис. 2. Профиль выхода тока вторичных ионов I при разных видах заземления электродов: а) заземлён нижний сплошной электрод, встречно-штыревая гребенка не заземлена; б) заземлён один из верхних электродов, нижний изолирован тонким стеклом. Числа в скобках обозначают атомные массы химических элементов.

На рис. 2 наибольший относительный выход ионов наблюдается для Al и Si, и при этом схема заземления электродов обуславливает геометрию протекания ионного тока: либо через поверхность образца, как на рис. 2, б (поперечный режим), либо через его объем – рис. 2, а (продольный режим). При всех вариантах заземления наиболее слабая реакция на освещение – для выхода ионов галлия. В то же время для ионов алюминия и кремния уменьшение относительного выхода ионов на свету наблюдается только при заземлении всех электродов (соответствующий график здесь не приводится). При заземлении одного из верхних электродов («гребенки») наблюдается не-большой локальный максимум выхода ионов алю-

миния, что может быть обусловлено эффектом «кратера» и подпылением соседнего алюминиевого электрода.

На основании расчета по стандартным формулам, можно объединить основные геометрические и физические данные в таблицу, характеризующую данную структуру как полевой транзистор с каналом, находящимся в слое AlGaAs p -типа, который со стороны GaAs имеет обедненный слой, создаваемый p - n -переходом, а с другой стороны имеет под встречно-штыревыми контактами тонкий слой диэлектрика SiO₂, мало влияющий на сопротивление. Расчет дал следующие параметры эквивалентного электронного полевого фототранзистора с p - n -переходом, отраженные в таблице.

Таблица

Параметры эквивалентного электронного полевого фототранзистора с p - n -переходом

Расстояние между электродами «гребенки» L , мкм	Холловская подвижность дырок в AlGaAs μ_H , см ² /(В с)	Длина электрода «гребенки» Z , мм	Толщина слоя AlGaAs d , нм	Диэлектрическая проницаемость канала ϵ_k	Крутизна транзистора B , мА/В ²
400	145	10	500	11	0,094

Значение удельной крутизны B данной структуры близко к обычной величине для кремниевого полевого транзистора с p - n -переходом (0,12 мА/В²) [9], что можно считать неплохим результатом, поскольку структура не предназначалась для этой цели. Нужно отметить, что смоделирован простейший вариант полевого транзистора на исследуемой структуре. При натурных измерениях на мишени масс-спектрометра возможны другие варианты, зависящие от схемы заземления.

Переходя от моделирования к натурному эксперименту на мишени, отметим, что подачей различного по величине и полярности напряжения на электроды модели (в натурном эксперименте – за счет автоматического смещения током ионного пучка) на электроды можно управлять выходом вторичных ионов, а полученная структура может послужить основой для нового вида прибора – экзоионного фототранзистора для оптоионики [8].

Заключение

В представленной работе более подробно, чем раньше [7, 8], исследовано влияние характера заземления контактов на выход вторичных ионов из полупроводниково-диэлектрической мишени и определена крутизна эквивалентного электронного полевого фототранзистора с p - n -переходом на затворе. При натурной реализации двухпараметрического управления (светом и электрическим полем) возможно получить мишень с двойным управлением выходом вторичных (экзо-) ионов,

что перспективно для создания пленочных наноструктур с управляемым составом.

Работа поддержана грантами РФФИ 16-07-00226 и 16-08-00524.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rokakh A. G., Shishkin M. I., Perepelitsyn Yu. N., Venig S. B., Matasov M. D. // Phys. Express. 2013. Vol. 3. No. 2. P. 1.
2. Стецюра С. В., Жуков А. Г., Сердобинцев А. А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 58.
3. Rokakh A. G., Zhukov A. G., Stetsura S. V. and Serdobintsev A. A. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B. 2004. Vol. 226. No. 4. P. 595.
4. Роках А. Г., Матасов М. Д., Жуков А. Г. // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5 № 5–6. С. 69.
5. Rokakh A. G., Matasov M. D. // Semiconductors. 2010. Vol. 44. No. 1. P. 98.
6. Rokakh A. G., Serdobintsev A. A., Stetsyura S. V., Zhukov A. G., Matasov M. D., Malyar I. V. Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis, and Applications. Ed. by J. K. Lang – New-York, 2009.
7. Роках А. Г., Матасов М. Д., Сердобинцев А. А., Александров В. А. / Труды XXII Международной научно-технической конференции, школы молодых специалистов и выставки по фотоэлектронике и приборам ночного видения. (Москва, 2012). С. 36.
8. Александров В. А., Сердобинцев А. А., Шишкин М. И., Зелепукин И. М., Вениг С. Б., Роках А. Г. / Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов. 2013). С. 276.
9. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Model of an exoion phototransistor

A. G. Rokakh, A. A. Serdobintsev, and M. I. Shishkin

N. G. Chernyshevsky Saratov State University
83 Astrakhanskaya st., 410012, Saratov, Russia
E-mail: rokakhag@mail.ru

Received August 30, 2016

On the multilayer semiconductor-dielectric structure of Cu (Al)-SiO-AlGaAs-GaAs-Cu (Al), used as a target of the mass spectrometer, a physical simulation of ionic processes by means of electronic ones on the model was realized. A better understanding of the management processes of secondary ion yield from the target using light and an electric field is obtained. The electronic properties of the target that is considered as a junction field effect phototransistor are described. Lighting was produced by using a halogen filament lamp. At modeling, the electrical bias was carried out with an electrical source, which simulates the real automatic bias to be created on the target by the bombarding ions current. The possibility of the double output control of the secondary (exo-) ions extends the functionality of the semiconductor-dielectric target which can be considered as the exoion phototransistor – a new device of the optoionics.

Keywords: secondary-ionic photoeffect, semiconductor-dielectric structure, physical (full-scale) modeling, exoion phototransistor, optoionics, secondary ions, equivalent electronic phototransistor.

REFERENCES

1. A. G. Rokakh, M. I. Shishkin, Yu. N. Perepelitsyn, S. B. Venig, and M. D. Matasov, *Phys. Express*, **3** (2), 1 (2013).
2. S. V. Stetsura, A. G. Zhukov, and A. A. Serdobintsev, *Technical Physics Letters* **32**, 58 (2006).
3. A. G. Rokakh, A. G. Zhukov, S. V. Stetsura and A. A. Serdobintsev, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, **B. 226**, 595 (2004).
4. A. G. Rokakh, M. D. Marasov, and A. G. Zhukov, *Rossiyskie Nanotekhnologii* **5** (5-6), 69 (2010).
5. A. G. Rokakh and M. D. Matasov, *Semiconductors* **44**, 98 (2010).
6. A. G. Rokakh, A. A. Serdobintsev, S. V. Stetsyura, A. G. Zhukov, M. D. Matasov, and I. V. Malyar, *Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis, and Applications*. Ed. by J. K. Lang. (New York, 2009).
7. A. G. Rokakh, M. D. Marasov, A. A. Serdobintsev, and V. A. Aleksandrov, in *Proceedings of XXII Intern. scientific technological conference, school of young specialists and exhibition on photoelectronics and night vision devices* (Moscow, 2012), P. 36.
8. V. A. Aleksandrov, A. A. Serdobintsev, M. I. Shishkin, I. M. Zelepukin, S. B. Venig, and A. G. Rokakh, in *Proceedings of VIII Russian young scientists conference "Nanoelectronics, nanophotonics and nonlinear physics"* (Saratov, 2013). P. 276.
9. I. P. Stepanenko, *Foundation of Microelectronics* (Laboratoriya Basovyykh Znaniy, Moscow, 2001) [in Russian].