

Влияние поверхностной проводимости полупроводникового электрода на распределение газоразрядного тока

© В.И. Орбух, Н.Н. Лебедева[¶], Б.Г. Саламов

Бакинский государственный университет, Институт физических проблем,
AZ 1148 Баку, Азербайджан

(Получена 31 марта 2008 г. Принята к печати 18 марта 2009 г.)

Исследуется плоская газоразрядная структура, где один из электродов — высокоомный полупроводник, который может обеспечить стабильное равномерное распределение тока и свечение газового разряда по всему объему газоразрядного зазора. Установлено, что влияние полупроводникового электрода на распределение стационарного тока в газоразрядном зазоре связано с проводимостью его приповерхностного слоя, а объемное сопротивление полупроводника определяет лишь сопротивление нагрузки. Экспериментально показано, что локальная металлизация поверхности полупроводника приводит к шнурованию в местах металлизации. Делается вывод, что основной причиной, ограничивающей вероятность шнурования тока и обеспечивающей стабилизацию разряда, является электрическое поле в газовом зазоре, перпендикулярное токовому шнуру в месте его контакта с полупроводником. Сделана качественная оценка этого эффекта. Очевидное условие малости этого поля по сравнению с продольным полем в шнуре допускает два типа шнурования. Во-первых, одиночный шнур при достаточно большой проводимости поверхностного слоя полупроводника. Во-вторых, большое количество шнуров, почти полностью покрывающих поверхность электродов, при малой поверхностной проводимости.

PACS: 73.25+i, 73.40.-c, 82.40.Np, 82.45.Fk

1. Введение

Стабилизация газового разряда высокоомным электродом [1] используется в приборах, где важны однородность распределения тока и свечения разряда по площади электродов, а также надежная локальная управляемость тока и свечения. Устройство, в котором реализуются эти условия, так называемая фотоионизационная система, было предложено в [2,3]. В качестве рабочего элемента в ней используют плоскую газоразрядную ячейку с узким зазором между металлическим электродом и пластиной из высокоомного и фоточувствительного полупроводника. Эта система и ее модификация нашли широкое техническое применение как преобразователь инфракрасного (ИК) изображения в видимое [3], как визуализатор электрических и структурных неоднородностей в полупроводниковых пластинах больших диаметров [4], как фотографическая система с несеребряной средой для фиксации изображений [5], как устройство для газоразрядного травления полупроводниковых пленок [6], как устройство, в котором наблюдаются пространственно-временные самоорганизованные нелинейные диссипативные структуры [7]. В основе действия всех этих устройств — стабилизация газового разряда (отсутствие шнурования) и локальная управляемость интенсивностью свечения за счет фоточувствительности полупроводникового электрода. Однозначного мнения о механизме стабилизации разряда полупроводниковым электродом нет. Чаще всего авторы ссылаются на распределенность сопротивления полупроводника по его объему [1]. В настоящей рабо-

те представлены результаты исследования физического механизма стабилизации газового разряда высокоомным электродом. Показано, что в структуре с полупроводниковым электродом узкий токовый шнур существовать не может. Связано это с тем, что из-за большого сопротивления полупроводника в месте контакта такого шнура с полупроводником (если бы он был возможен) возникает поле, перпендикулярное шнуру, которое на несколько порядков превосходит поле вдоль шнура.

2. Эксперимент

Исследовался плоский газоразрядный зазор (ГРЗ) со следующими параметрами. Площадь электродов $S = 3 \text{ см}^2$, межэлектродное расстояние $d = 40\text{--}70 \text{ мкм}$. Один электрод — мелкая металлическая сетка, либо низкоомный слой SnO_2 на стеклянной шайбе. Второй электрод — пластина из высокоомного арсенида галлия. Пластины, ориентированные в направлении [100], вырезались из слитка монокристаллического GaAs:Cr , полученного методом Чохральского (n -тип проводимости, $\rho = 10^7\text{--}10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, подвижность $\mu_n \approx 3000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$). В таком материале отношение сопротивления в темноте и на свету интенсивностью $4 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$ на длине волны $\lambda = 1.0 \text{ мкм}$ было 10^2 . В максимуме примесной фотопроводимости, обусловленной примесью хрома, это отношение составляло $0.7 \cdot 10^2$ на длине волны $\lambda = 1.4 \text{ мкм}$. Диаметр и толщина полупроводникового электрода были соответственно 20 и 1 мм. С внешней стороны пластина покрывалась тонким слоем Ni (70% пропускания), который служил контактом и через который при засветке фотоактивным светом ($\lambda > 0.95 \text{ мкм}$) можно было изменять сопротивление

[¶] E-mail: nnlebedeva@gmail.com

полупроводника. Засветка осуществлялась светом лампы накаливания, прошедшим через кремниевый фильтр, пропускающий свет $\lambda > 0.95$ мкм, который в пластине GaAs толщиной в 1 мм поглощается по всему объему.

Исследовались различные варианты ГРЗ: структура типа А — полупроводник обращен к зазору свободной поверхностью; структура типа В — поверхность полупроводника, обращенная к зазору, покрыта сплошным металлическим слоем (Ni, напыленный в вакууме), так что сопротивление полупроводника полностью локализовано между двумя металлическими слоями на его поверхностях; структура типа С — поверхность полупроводника, обращенная к зазору, покрыта системой точечных металлических электродов (концентраторов тока), напыленных на поверхность полупроводника через маску.

Зазор между полупроводником и металлическим контрэлектродом осуществлялся слюдяной прокладкой с круглым вырезом, площадь которого ($1-3$ см²) определяла рабочую площадь ГРЗ. Газоразрядная ячейка собиралась в кассете, которая помещалась в камеру, снабженную двумя окнами для засветки полупроводника и для визуальной и фотографической регистрации свечения газового разряда, электрическими вводами и выводом для откачки газа из камеры. Давление в камере регистрировалось манометром с точностью до 3 Торр. Постоянное стабилизированное напряжение было в интервале 40–1000 В. Ток разряда регистрировался в интервале $10^{-9}-10^{-3}$ А. Свечение разряда наблюдалось визуально через прозрачный контрэлектрод и фотографировалось. Интенсивность свечения регистрировалась фотоумножителем ФЭУ-18.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись в следующем режиме. После предварительной откачки воздуха до $p = 10^{-1}$ Торр в камере устанавливалось рабочее давление $p = 60$ Торр и на ячейку подавались фиксированные напряжения. Ток при каждом напряжении регистрировался после установления стационарного значения. ВАХ для ГРЗ между металлическим электродом и свободной поверхностью полупроводника (в структуре типа А) характеризуется плавным ростом тока при $U > 350$ В и равномерным свечением газового разряда по всей площади электрода (рис. 1). При перемене полярности на электродах ВАХ и характер разряда не

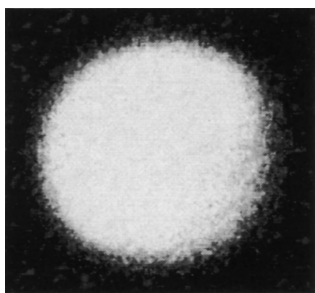


Рис. 1. Равномерное свечение разряда в структуре типа А.

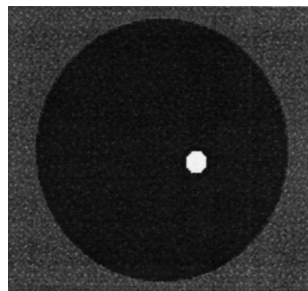


Рис. 2. Шнурование разряда в структуре типа В.

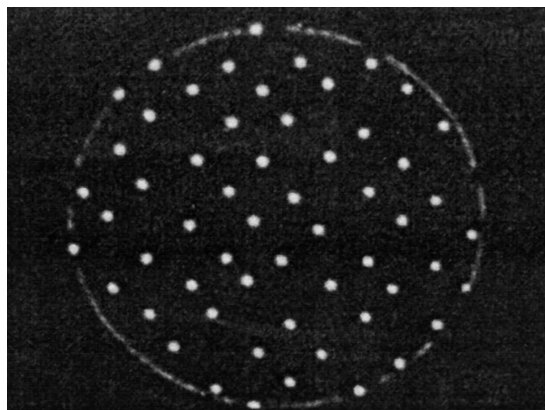


Рис. 3. Шнурование разряда в структуре типа С.

менялись. На ВАХ для ГРЗ между двумя металлическими электродами (в структуре типа В) при $U < 450$ В ток не регистрируется, в интервале 500–600 В наблюдаются „вспышечные“ выбросы тока около нулевого значения на шкалах 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} , 10^{-6} А. При $U > 600$ В устанавливается стабильный ток и возникает светящийся шнур, который может перемещаться по площади электрода (рис. 2). В системе с концентраторами тока (в структуре типа С) разряд шнуруется в местах нанесения концентраторов (рис. 3). Измерения показали, что число шнуров определяется числом концентраторов; увеличение числа концентраторов и уменьшение их площади до $S \approx 0.1$ мм² приводит к сужению шнуров и распределению их по всей площади полупроводника. Напряжение, при котором зажигаются все шнуры, совпадает с напряжением зажигания одного шнура. При одинаковом токе разряда интенсивности свечения во всех разрядах совпадают.

3. Обсуждение

Основные результаты наших экспериментов заключаются в следующем.

1. Замена одного из двух металлических электродов высокоомным полупроводниковым (при сохранении всех параметров структуры и сопротивления нагрузки, равного сопротивлению полупроводника) стабилизирует

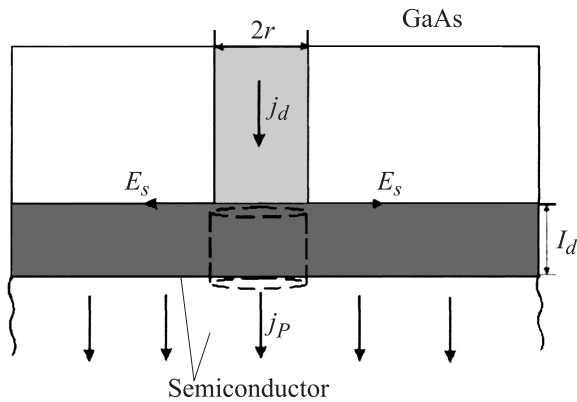


Рис. 4. Структура распределения токов и электрического поля на границе шнура с полупроводником при их прямом контакте.

поперечное распределение поля, т.е. исключает его шнурование.

2. Напыление металлических островков (концентраторов) на поверхность полупроводника приводит к образованию токовых шнуров, причем со стороны полупроводника они локализируются на металлических островках.

3. Оба эффекта не зависят от полярности приложенного напряжения.

Наше объяснение полученных результатов основано на следующем. Для устойчивого существования токового шнура необходимо, чтобы поле, перпендикулярное шнуру (E_s), всюду, в том числе и в месте контакта шнура с электродом, по крайней мере не превосходило поле, параллельное шнуру (E_g). Предположим, что, вопреки выводу 1, в структуре с полупроводниковым электродом реализуется шнурование тока, и оценим E_s/E_g . Предположим, что в такой структуре распределение тока неоднородно, т.е. ток представляет собой узкий шнур радиусом r . Рассмотрим в полупроводнике цилиндр радиусом r и высотой порядка длины экранирования l_d на границе полупроводника и зазора (рис. 4). Из условия непрерывности тока получаем

$$(j_g - j_p)\pi r^2 = j_s 2\pi r l_d. \quad (1)$$

Здесь j_g — плотность тока в шнуре, j_p — однородная плотность тока в полупроводнике вне области экранирования, j_s — плотность тока внутри области экранирования, параллельного поверхности полупроводника. Учитывая, что $j_p S = N j_g \pi r^2$ (S — площадь полупроводника, N — число шнуров), $j_s = \sigma_s E_s$ (σ_s — проводимость в приповерхностном слое полупроводника, E_s — поле в нем, параллельное границе раздела), $j_p = \sigma_p E_p$ (σ_p — проводимость полупроводника, E_p — поле в объеме полупроводника), из (1) получаем

$$\frac{E_s}{E_g} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_0 - U_g}{U_g} \right) \frac{\sigma_p}{\sigma_s} \frac{r}{l_d} \frac{L_g}{L_p} \left(\frac{S_p}{N\pi r^2} - 1 \right). \quad (2)$$

Здесь E_g — поле в газе, L_g и L_p — длина газового зазора и полупроводниковой пластины. Кроме того, мы

учли, что $L_g E_g = U_0 - IR$, где U_0 — напряжение на всей системе, U_g — напряжение на газовом зазоре, R — сопротивление полупроводника.

Так как на границе раздела двух сред касательная составляющая поля не изменяется [8], то E_s — это одновременно и поперечное поле на границе газового шнура, примыкающей к полупроводнику. Для существования шнура необходимо, чтобы (2) было мало. В условиях нашего эксперимента при пробое газа в структуре с металлическими электродами величина U_0/U_g порядка нескольких единиц. Радиус шнуров (r) был порядка 0.5 мм. Будем исходить из того, что если бы шнур реализовался в структуре с полупроводником, т.о. эти величины были бы такими же: $L_g = 50$ мкм, $L_p = 1$ мм, $S_p = 1$ см². Принимая для длины экранирования $l_d = 10^{-5}$ см, из (2) получим

$$\frac{E_s}{E_g} = 10^4 \frac{\sigma_p}{\sigma_s}. \quad (3)$$

Считая $\sigma_p \approx \sigma_s$, получим из (3), что поле, перпендикулярное шнуру, на 4 порядка больше поля, параллельного ему. Ясно, что в таких условиях шнур на границе с полупроводником существовать не может. Из (2) следует, что в системе с двумя металлическими электродами ($l_d \sigma_s \propto \sqrt{n}$, где n — концентрация носителей в приповерхностном слое металла), $E_s/E_g \rightarrow 0$, и шнур существовать может. В такой трактовке роль металлического электрода в том, что он экранирует поперечное поле E_s на границе шнура с электродом. Для этого достаточно, чтобы площадь металлического электрода была больше или порядка радиуса шнура, что мы и наблюдаем при возникновении токового шнура между контрэлектродом и сплошным металлическим слоем на всей поверхности полупроводника, а также между контрэлектродом и металлическими островками на поверхности полупроводника. Как следует из (2), существование шнура возможно при большой проводимости приповерхностного слоя полупроводника σ_s . Однако из этой же формулы следует, что возможно одновременное возникновение большого количества шнуров, почти полностью покрывающих поверхность электродов. В этом случае плотность тока по обе стороны от приповерхностного слоя полупроводника одного порядка, поэтому ток, а следовательно, и E_s малы. При этом множитель в скобках близок нулю и (2) снова мало. Это действительно наблюдалось [9] на аналогичной газоразрядной структуре с Si[Pt] в качестве полупроводникового электрода, где структура из светящихся шнуров почти полностью покрывала поверхность электродов (см. рис. 6 в работе [9]). С увеличением тока (что достигалось засветкой полупроводника фотоактивным светом) количество и радиусы шнуров увеличивались. В соответствии с формулой (2) увеличение σ_p действительно может быть скомпенсировано увеличением количества шнуров N и их радиусов r . Традиционно стабилизацию газового разряда высокоомным электродом в большинстве работ связывают с распределенным

сопротивлением полупроводника. В этой связи отметим, что в стационарном режиме и при выполнении закона Ома для однородного полупроводника (реально это условие выполняется) никаких неоднородностей поля и тока в объеме полупроводника быть не может, так как все заряды сосредоточены в приповерхностном слое шириной порядка длины экранирования. Отметим, что наше объяснение согласуется с тем, что именно распределение полей определяет устойчивое существование токового шнура [10].

Таким образом, в настоящей работе показано, что поперечное распределение тока в газоразрядной структуре с полупроводниковым электродом определяется его поверхностной проводимостью.

Список литературы

- [1] P.R. Blaszkuk. Patent USA, Int.C1.HOI 17/06, 3.743.881 (July 3, 1973).
- [2] Л.Г. Парицкий, С.М. Рывкин. ФТП, **4**, 764 (1970).
- [3] Ю.А. Астров, В.В. Егоров, Ш.С. Касымов, В.М. Муругов, Л.Г. Парицкий, С.М. Рывкин. Квант. электрон., **4** (8), 1681 (1977).
- [4] B.G. Salamov, N.N. Lebedeva, B.G. Akinoglu, K. Allakhverdiev. J. Phys. D: Appl. Phys., **27**, 1229 (1994).
- [5] А.Х. Зейналлы, Н.Н. Лебедева, Л.Г. Парицкий, Б.Г. Саламов. J. Photographic Sci., **39**, 114 (1991).
- [6] B.G. Salamov, B.G. Akinoglu, N.N. Lebedeva. J. Phys. D: Appl. Phys., **32**, 2068 (1999).
- [7] Ю.А. Астров, Х.Г. Пурвинс. Письма ЖТФ, **28** (21), 62 (2002).
- [8] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред* (М., Наука, 1982).
- [9] E.L. Gurevich, A.W. Liehr, Sh. Amiranashvili, H.G. Purwins. Phys. Rev. E, **69**, 036 211 (2004).
- [10] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда* (М., Наука, 1987).

Редактор Л.В. Беляков

Influence of the surface conductivity of a semiconductor electrode on the gas–discharge current distribution

V.I. Orbukh, N.N. Lebedeva, B.G. Salamov

Baku State University, Institute for Physical Problems, AZ 1148 Baku, Azerbaijan

Abstract A planar gas–discharge structure, when one of the electrodes is a high-ohmic semiconductor that can guarantee the stable homogeneous current distribution and discharge light in the whole bulk of the gap is investigated. It is established that the influence of a semiconductor electrode on the steady-current distribution in gas–discharge gap is in direct relation with the surface conductivity of a semiconductor. The bulk semiconductor conductivity affects only the load resistance. It is experimentally verified that the local metallization of the semiconductor surface leads to the current density filamentation in the points of metallization. The primary reason limiting the probability of current filamentation and providing the discharge stabilization was concluded to consist in an electric field in a gas–discharge gap lateral to the current filament at the point of its contact with a semiconductor. Analytical estimation of this effect has been made. An obvious small value of this field in the current filament in comparison with the value of longitudinal field permits two kinds of filamentation: 1) in the form of a solitary filament in reasonably high surface conductivity of a semiconductor; 2) in the form of a great number of filaments almost completely covering a surface of electrodes in low conductivity.