

УДК 537.311

**ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНТАКТА
ВЫСОКООМНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЗОНДА
С ПЛАЗМОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА РАЗРЯДА
В ГЕЛИИ**

А.Х.МУРАДОВ, Ш.А.АЛЛАХВЕРДИЕВ
*Бакинский Государственный Университет,
Институт Физических Проблем*
a_muradov@yahoo.com

Измерены вольт-амперные характеристики плоского полупроводникового зонда, помещенного в гелиевую газоразрядную плазму. Изучено влияние постороннего излучения на зондовую характеристику. Обнаружено, что под действием излучения величина зондового тока сильно возрастает, плавающий потенциал смещается в сторону электронной части характеристики. Величина смещения интерпретируется как глубина проникновения поля в полупроводник. Измерены также первые производные вольт-амперных характеристик полупроводникового зонда. Под действием внешнего излучения производные характеристик также смещаются.

Ключевые слова: контакт плазмы и полупроводника, полупроводниковый зонд, зондовая характеристика, глубина проникновения поля в полупроводник.

Решение таких вопросов, как стабилизация работы различных приборов газового разряда, [1,2] преобразование инфракрасного излучения в видимое, передача изображений и бессеребряное фотографирование [3-5] и т. д. осуществляется с помощью газоразрядных ячеек с высокоомным полупроводниковым электродом. В этих ячейках используется узкий газоразрядный зазор с плоским металлическим электродом и пластиной из высокоомного и фоточувствительного полупроводника. В такой системе возникает контакт полупроводника с плазмой газового разряда. Наличие этого контакта существенным образом влияет на свойства газового разряда и коренным образом отличает его от классических затрудненных и барьерных разрядов. Однозначного мнения о механизме стабилизации разряда с полупроводниковым электродом и физической интерпретации процессов в такой газоразрядной ячейке не существует. Однако физические процессы, происходящие в контакте полупроводника

и плазмы, играют определяющую роль в формировании разряда. В литературе, посвященной изучению этого вопроса, неизвестны исследования непосредственного контакта полупроводника с плазмой.

В данной работе измерены вольт-амперные характеристики плоского полупроводникового зонда, помещенного в гелиевую газоразрядную плазму. Изучено влияние постороннего излучения на зондовую характеристику. Обнаружено, что под действием излучения величина зондового тока сильно возрастает, плавающий потенциал смещается в сторону электронной части характеристики. Величина смещения интерпретируется как глубина проникновения поля в полупроводник. Измерены также первые производные вольт-амперных характеристик полупроводникового зонда. Под действием внешнего излучения производные характеристик также смещаются.

Измерялась ВАХ полупроводникового зонда, помещенного в газоразрядную плазму. Зонд был изготовлен из высокоомного образца арсенида галлия ($\rho = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{М}$) в виде диска толщиной 1 мм и диаметром 8 мм. Боковая и тыльная стороны зонда были покрыты стеклом так, что с плазмой контактировала только обращенная к ней поверхность. С помощью проводящей пасты зонд был приклеен к никелевому лепестку соединенному с молибденовым проводником, служившим выводом для измерений.

В качестве плазмы, контактирующей с полупроводником бралась плазма газового разряда, образующаяся в положительном столбе (ПС) разряда в гелии. Разрядная трубка длиной 50 см и с внутренним диаметром 2,4 см имела катод прямого накала из вольфрамовой нити и никелевый конусообразный анод. Такая форма анода бралась для гашения анодных колебаний, т. к. из-за сильной нелинейности вольтамперной характеристики зонда наличие колебаний параметров плазмы, особенно колебаний потенциала пространства, могут сильно исказить форму ВАХ.

Выбор гелия в качестве рабочего газа вызван следующими обстоятельствами:

При изучении влияния постороннего излучения на зондовые характеристики, возможно влияние излучения на электрические параметры самой плазмы. Так, поглощение постороннего излучения может перевести атом с метастабильного на резонансное состояние и тем самым уменьшить заселенности метастабильных уровней. Последнее может привести к уменьшению скорости ионизации и вследствие этого изменению электрического поля и потенциала в точке расположения зонда. В случае гелия интеркомбинационные переходы излучением запрещены, поэтому атом гелия находящийся в метастабильном состоянии 2^3S_1 , на долю которого приходится основная часть ступенчатой ионизации, поглотив фотон, переходит на высокорасположенный триплетный уровень,

а затем, испустив фотон, опять переходит в триплетное метастабильное состояние. Поэтому постороннее излучение почти не влияет на заселенности метастабильных уровней. Кроме того, в гелии исключается влияние излучения на электрические параметры плазмы в результате фотоионизации, т. к. порог фотоионизации с основного состояния находится в области вакуумного ультрафиолета, а с метастабильного состояния – за $0,26\mu\text{к}$.

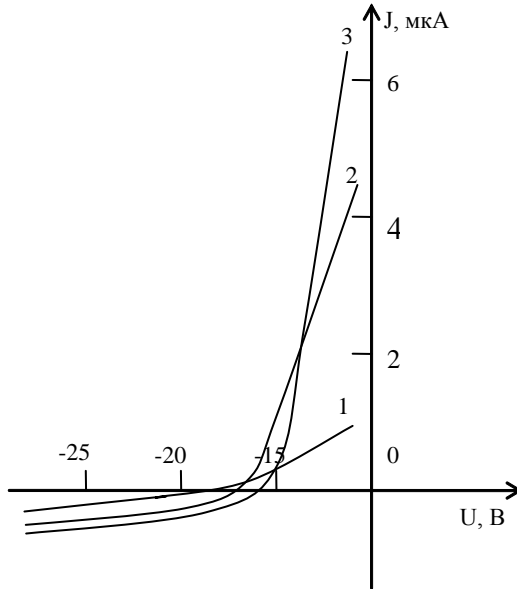


Рис. 1. Зондовые характеристики, измеренные при различных освещенностях зонда. 1 – 0%, 2 – 50%, 3 – 100%. ($\text{He}, P = 26,7\text{Па}, J_p = 150\text{мА}$).

Отсутствие зависимости электрических параметров плазмы от постороннего излучения экспериментально проверялось облучением плазмы с помещенным в нее металлическим зондом. При этом во всем диапазоне разрядных условий изменения потенциала металлического зонда не наблюдалось.

В разряде в инертных газах в очень широких пределах изменения разрядных условий существуют бегущие слои - страты. При наличии в положительном столбе страт все электрические параметры периодически изменяются, и вследствие этого, определение плавающего потенциала становится невозможным. В случае гелия возможен подбор разрядных условий так, что в области отсутствия страт (ниже границы существования) можно было проводить измерения при изменении силы разрядного тока и давления на порядок.

На рис.1 приведены зондовые характеристики, измеренные вблизи нуля, при различных освещенностях зонда. Измерения проведены при

условии $P=26,7$ Па, и силе разрядного тока $J_p = 150$ мА. В качестве источника излучения использовался проектор с большой светосилой. Изменение интенсивности излучения проводилось с помощью нейтральных фильтров. Из рисунка видно, что с ростом интенсивности излучения зондовые характеристики возрастают круче, вся характеристика смещается и положение плавающего потенциала меняется.

На рис.2 приведены зависимости изменений плавающего потенциала ΔU_0 от интенсивности излучения при различных давлениях газа. С ростом интенсивности излучения значения плавающего потенциала полупроводникового зонда приближаются к плавающему потенциалу металлического зонда. При проведении измерений было обнаружено, что с увеличением разрядного тока абсолютные значения зондовых токов растут. С ростом давления изменения ΔU_0 от интенсивности излучения уменьшается. Это по-видимому связано с тем, что при низких давлениях теплопроводность газа низка, и под действием излучения полупроводниковый образец нагревается до высоких температур, и вследствие этого уменьшается его сопротивление. С ростом давления теплопроводность газа увеличивается и поэтому устанавливается более низкая температура и низкая проводимость зонда.

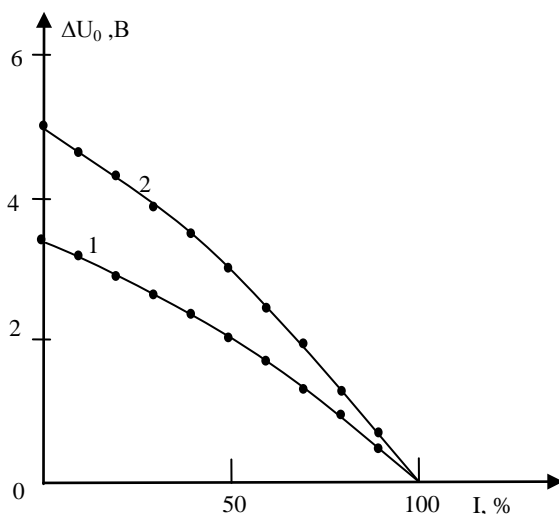


Рис. 2. Зависимость плавающего потенциала полупроводникового зонда от интенсивности излучения при различных давлениях газа (1. – $P = 80$ Па, $J_p = 50$ мА ;

2. – $P = 26,7$ Па, $J_p = 50$ мА)

Определение потенциала пространства по максимуму первой производной позволяет более точное его определение чем другими способа-

ми (например по излому полулогарифмической характеристики). Поэтому были измерены также первые производные вольт-амперных характеристик полупроводникового зонда радиотехническим методом. В цепь измерительного зонда вводился переменный сигнал малой амплитуды. Присутствие этого сигнала наряду с постоянным зондовым смещением приводит к возникновению переменных составляющих зондового тока, связанных с различными степенями производных [6]. Для их измерений соответствующая гармоника усиливалась и регистрировалась. В нашем случае частота дополнительного сигнала была равна 600Гц. Гармоника на этой частоте усиливалась узкополосным усилителем, детектировалась синхронным детектором и записывалась самопишущим потенциометром.

На рис 3. приведены первые производные зондовых характеристик при различных освещенностях зонда. Измерения проведены при тех же условиях. Из рисунка видно, что с ростом интенсивности излучения величина сигнала возрастает, максимумы первых производных смещаются в сторону положительных потенциалов. Рост величины первой производной связан с увеличением силы зондового тока при облучении. Смещение максимумов свидетельствует о проникновении поля внутрь полупроводника поэтому это смещение также может служить мерой проникновения.

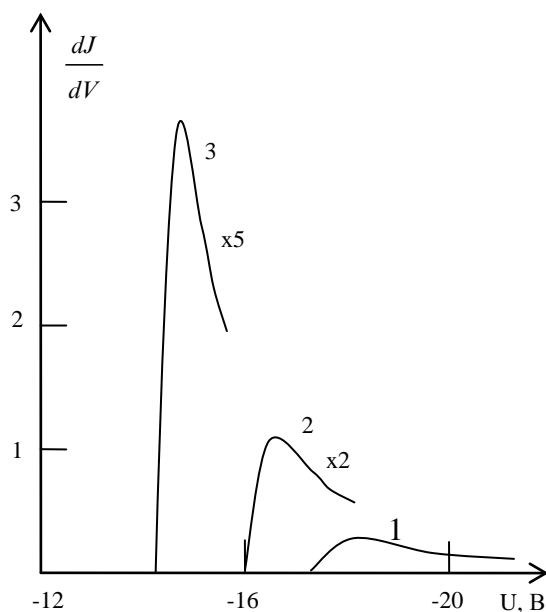


Рис. 3. Первые производные зондовых характеристик, измеренные при различных освещенностях зонда. 1 – 0%, 2 – 50%, 3 – 100%. ($He, P = 26,7 Па, J_p = 150 мА$).

Распределение потенциала в окрестности зонда должно быть найдено из уравнения Пуассона. В случае плоской геометрии это уравнение, определяющее распределение потенциала в слое, имеет простой вид:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -4\pi e(n_i - n_e) \quad (1)$$

При отрицательных значениях потенциала концентрация электронов подчиняется распределению Больцмана

$$n_e = n_0 \exp\left(-\frac{e(V - V_0)}{kT_e}\right), \quad (2)$$

где n_0 , V_0 - концентрация и потенциал у границы слоя, T_e - электронная температура в невозмущенной плазме.

Из условия равенства ионного тока во всех точках имеем

$$n_i = n_0 \sqrt{\frac{V_0}{V}}. \quad (3)$$

Таким образом, концентрация ионов, по мере их ускорения, уменьшается. Подстановка (2) и (3) в уравнение (1) приводит к

$$\frac{d^2V}{dx^2} = n_0 e \left[\sqrt{\frac{V_0}{V}} - e^{\frac{e(V-V_0)}{kT_e}} \right], \quad (4)$$

Исключая n_e и n_i для $V < 0$ и интегрируя полученное уравнение с учетом граничных условий $\frac{dV}{dx} = 0$ при $V = V_c$ получаем [7]:

$$\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 = -8\pi e n_c \left\{ 2V_c \left[\left(\frac{V}{V_c}\right)^{3/2} - 1 \right] - \frac{kT_e}{e} e^{\frac{e(V-V_c)}{kT_e}} - 1 \right\} \quad (5)$$

Здесь V_c - потенциал на границе ионного слоя пространственного заряда, отсчитываемая по отношению к невозмущенной плазме. Из решения этого уравнения следует, что в околосондовой области формируется слой пространственного заряда. Внутри этого слоя при приближении к зонду потенциал быстро растет, а концентрации электронов и ионов падают, причем электронная концентрация падает гораздо быстрее ионной. Поэтому плотность заряда имеет максимум на некотором расстоянии R_0 от поверхности зонда. Начиная от этого максимума потенциал медленно спадает по мере удаления от зонда до расстояний порядка нескольких радиусов Дебая.

С приближением к потенциалу пространства от больших отрицательных потенциалов толщина слоя уменьшается. При этом на зонд течет электронный ток с плотностью

$$j = ne\sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} \quad (6)$$

Если теперь заменить металлический зонд на высокоомный полупроводниковый, то зонд не может отобрать от плазмы электронный ток с плотностью, определяемой формулой (6). Сила зондового тока уменьшается, поверхностный потенциал смещается в сторону плавающего потенциала.

Таким образом, в точках, расположенных ближе от максимума плотности пространственного заряда к поверхности зонда часть разности потенциалов падает в объеме полупроводника, а в точках, расположенных дальше максимума плотности, распределение потенциала почти не меняется, и зависимость силы тока от приложенного потенциала ослабевает. Этого хорошо видно из измеренных характеристик. Т. к. при этом характеристика целиком деформируется и смещается, то плавающий потенциал также перемещается, и смещение плавающего потенциала может служить мерой проникновения поля вглубь полупроводника. Следовательно измерив смещение плавающего потенциала можно оценить глубину проникновения поля в полупроводник. Как следует из рисунка 2, изменение плавающего потенциала представляет собой величину порядка нескольких вольт, и возрастает с уменьшением давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Astrov Y.A., Logvin Y.A. Formation of clusters of localized states in a gas discharge system via a self-completion scenario. *Phys. Rev. Lett.* 1997, v.79, p. 2983-2986.
2. Gurevich E.L., Liehr A.W., Amiranashvili Sh., et al. Role of surface charges in dc gas-discharge systems with high-ohmic electrodes. *Physical Review E.* 2004, v.69, p. 036211-1-7.
3. Парицкий Л.Г., Рывкин С.М. Использование полупроводников для осуществления фотографического процесса в длинноволновой области. *ФТП*, 1970, т.4, с. 764-771.
4. Лебедева Н.Н., Орбух В. И., Султанов Ч.А. Газоразрядная система с цеолитовым электродом. *ЖТФ*, 2010, т. 80, с. 134-137.
5. Орбух В.И., Лебедева Н.Н., Саламов Б.Г. Влияние поверхностной проводимости полупроводникового электрода на распределение разрядного тока. *ФТП*, 2009, т.43, с.1329-1332.
6. Каган Ю.М. Распределение электронов по скоростям в положительном столбе разряда. *Сб. Спектроскопия газоразрядной плазмы / Под ред. Фриша С.Э., Л.: Наука. 1970. С. 201-223.*
7. Грановский В.Л. *Электрический ток в газе.* М.: Наука, 1971. 543 с.

YÜKSƏK OMLU YARIMKEÇİRİCİ ZONDUN HELİUMDA QAZ BOŞALMASI PLAZMASI İLƏ KONTAKTININ VOLT-AMPER XARAKTERİSTİKASI

Ə.X.MURADOV, Ş.A.ALLAHVERDİYEV

XÜLASƏ

Heliumda qaz boşalması plazmasına yerləşdirilmiş müstəvi yarımkeçirici zondun volt-ampere xarakteristikası ölçülmüşdür. Kənar şüalanmanın zond xarakteristikasına təsiri öyrənilmişdir. Şüalanmanın təsiri ilə zond cərəyanının kəskin artdığı və üzən potensialın xarakteristikasının elektron hissəsi tərəfinə sürüşdüüyü müəyyən edilmişdir. Sürüşmənin miqdarı sahənin yarımkeçirici daxilində nüfuz etmə dərinliyi kimi interpretasiya olunur. Yarımkeçirici zondun volt-ampere xarakteristikasının birinci tərtib törəməsi də ölçülmüşdür. Şüalanmanın təsiri ilə xarakteristikaların törəmələrinin də sürüşdüüyü müşahidə edilmişdir.

Açar sözlər: plazma ilə yarımkeçiricinin kontaktı, yarımkeçirici zond, zond xarakteristikası, sahənin yarımkeçirici daxilində nüfuz etmə dərinliyi.

VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF THE CONTACT OF THE HIGH OHMIC SEMICONDUCTOR PROBE WITH THE HELIUM DISCHARGE PLASMA

A.Kh.MURADOV, S.A.ALLAHVERDIYEV

SUMMARY

The volt-ampere characteristics of plane semiconductor probe, placed in a helium gaseous discharge plasma have been measured. The external radiation influence on the measured characteristics is studied. It has been obtained that under the influence of radiation probe the current drastically increases and the floating potential shifts towards the electron part of the characteristics. The shift is interpreted as a result of electric field penetrating deep into the semiconductor. The first derivatives of volt-ampere characteristics of the probe are measured. The derivatives of the characteristics are shifted as well.

Key words: the contact of plasma and semiconductor, semiconductor probe, probe characteristics, penetration depth of field into semiconductor

Поступила в редакцию: 28.11.2011 г.

Принята к печати: 05.03.2012 г.