

УДК 537.311

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ВЫСОКООМНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЗОНДА
В ПЛАЗМЕ НЕОНОВОГО РАЗРЯДА****А.Х.МУРАДОВ***Бакинский Государственный Университет,
Институт Физических Проблем
a_muradov@yahoo.com*

Радиотехническим методом определены первые производные вольт – амперной характеристики плоского полупроводникового зонда, помещенного в неоновую газоразрядную плазму. Под действием внешнего излучения величина зондового тока сильно возрастает, максимумы производных смещаются в сторону электронной части характеристики. Смещения максимумов интерпретируется как глубина проникновения поля в полупроводник. По зависимости потенциала смещения максимума первой производной характеристики от давления газа при одинаковой освещенности зонда дана интерпретация смещения характеристик.

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

Одним из наиболее эффективных методов стабилизации работы электрических разрядов является использование полупроводниковых электродов взамен обычных металлических [1, 2]. Существенное влияние полупроводникового электрода на устойчивость разряда связано с процессами, происходящими в контакте полупроводника и плазмы. Единого мнения о механизме стабилизации разряда с полупроводниковым электродом и физической интерпретации контактных явлений на границе полупроводника и плазмы не существует. Имеется ряд отрывочных экспериментальных и расчетных работ. Наиболее интересными и обстоятельными являются исследования, проведенные в узких газоразрядных ячейках с полупроводниковым электродом [3-5]. Непосредственное изучение контакта высокоомного полупроводникового электрода с гелиевой плазмой проводилось в работе [6]. Измерена ВАХ плоского полупроводникового зонда, помещенного в положительный столб разряда в ге-

лии. Обнаружено, что под действием внешнего излучения плавающий потенциал смещается в сторону электронной части характеристики. По величине этого смещения оценена глубина проникновения поля в полупроводник.

В настоящей работе измерены первые производные ВАХ полупроводникового зонда, помещенного в неоновую газоразрядную плазму. Под действием внешнего излучения производные характеристики смещаются в сторону электронной части. Величина смещения интерпретируется как глубина проникновения электрического поля в полупроводник. По зависимости потенциала смещения максимума первой производной характеристики от давления газа при одинаковой освещенности дана интерпретация смещения характеристик.

Полупроводниковый зонд, изготовленный из высокоомного образца GaAs ($\rho = 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) в виде диска толщиной 1 мм и диаметром 8 мм, помещался положительный столб дугового разряда с искусственно накаливаемым катодом. Боковая и тыльная стороны зонда были покрыты стеклом так, чтобы контактировала с плазмой только обращенная к ней поверхность. С помощью проводящей пасты зонд был приклеен к молибденовому проводнику, служившему выводом для измерений.

В качестве плазмы, контактирующей с полупроводником, бралась плазма положительного столба дугового разряда в неоне с искусственно накаливаемым катодом. 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 неона 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 неона атом, находящийся в метастабильном состоянии 2^3s_5 , на долю которого приходится почти вся ступенчатая ионизация, поглотив фотон, переходит на высокорасположенный уровень, а затем, испустив фотон, опять переходит в метастабильное состояние. Поэтому постороннее излучение почти не влияет на заселенности метастабильных уровней. Кроме того, в неоне исключается влияние излучения на электрические параметры плаз-

мы в результате фотоионизации, т. к. порог фотоионизации с основного состояния находится в области вакуумного ультрафиолета, а с метастабильного состояния – за $0,26\mu k$.

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 слоистраты. При наличии в положительном столбе страт все электрические параметры периодически изменяются, и вследствие этого, вольт-амперная характеристика размывается. В случае неона можно подбирать разрядные условия так, чтобы амплитуда стратовых колебаний и глубина модуляции параметров была мала. Кроме того электронные температуры в неоне существенно меньше, чем в случае гелия и, поэтому характерные расстояния в вольт-амперной характеристике, например, расстояние между плавающим потенциалом и потенциалом пространства, относительно невелики.

Наибольшее распространение получили радиотехнические методы нахождения производных зондового тока по потенциалу зонда [7]. В цепь измерительного зонда вводится переменный сигнал малой амплитуды. Присутствие этого сигнала наряду с постоянным зондовым смещением приводит к возникновению переменных составляющих (гармоники) зондового тока, связанных с различными степенями производных. Для их измерений соответствующая гармоника усиливалась и регистрировалась.

Если дополнительный сигнал синусоидальный, т.е. $V_1 = A \cos \omega t$, то потенциал зонда будет равен $V + V_1$, а ток в зондовой цепи является функцией

$$J = f(V + A \cos \omega).$$

Если амплитуда A достаточно мала, то, разлагая правую часть в ряд Тейлора, можно написать:

$$J(V + V_1) = J(V) + \frac{A^2}{4} J''(V) + \dots \left[AJ'(V) + \frac{A^3}{8} J''(V) + \dots \right] \cos \omega t + \\ + \left[\frac{A^2}{4} J'' + \dots \right] \cos 2\omega t + \dots$$

Из этого выражения видно, что амплитуда гармоники на частоте ω пропорциональна первой производной зондового тока, если всеми членами

амплитудного ряда при этой гармонике можно пренебречь по сравнению с первым.

В нашем случае частота дополнительного сигнала была равна 600Гц. Из сопротивления $R = 50 \text{ Ом}$, помещенного в зондовую цепь сигнал подавался на вход узкополосного усилителя. Гармоника на этой частоте усиливалась, детектировалась синхронным детектором и записывалась самопишущим потенциометром.

На рис 1. приведены первые производные зондовых характеристик при различных освещенностях зонда. Измерения проведены при условии $P = 0,2 \text{ Торр}$ и силе разрядного тока $J_p = 100 \text{ мА}$. При этих условиях амплитуда регулярных стратических колебаний была минимальна. В качестве источника излучения использовался проектор "Свистязь". Изменение интенсивности излучения проводилось с помощью нейтральных фильтров. Из рисунка видно, что с ростом интенсивности излучения величина сигнала возрастает, максимумы первых производных смещаются в сторону электронной части характеристики. Рост величины первой производной связан с увеличением силы зондового тока при облучении.

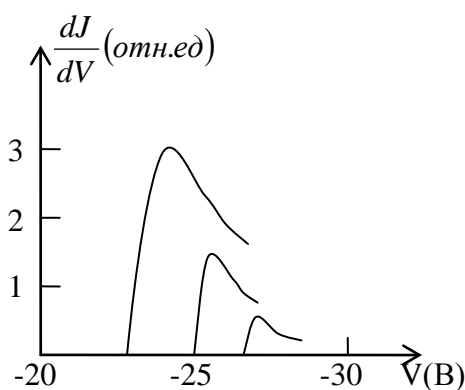


Рис. 1. Первые производные зондовых характеристик, измеренных при различных освещенностях зонда. 1 - 0%, 2 - 50%, 3 - 100% ($Ne, P=0,2 \text{ Торр}, J_p=100 \text{ мА}$).

Максимум первой производной соответствует потенциалу пространства в точке расположения зонда. Смещение максимумов свидетельствует о проникновении поля внутрь полупроводника, поэтому это смещение может служить мерой проникновения.

На рис.2 приведена зависимость величины смещения максимумов первых производных характеристик от давления газа при максимальной освещенности зонда. С ростом давления, при одной и той же силе разряд-

ного тока, $U_{см}$ уменьшается. Это, по-видимому, связано с тем, что при низких давлениях теплопроводность газа низка, и под действием внешнего 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.

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:

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

Исключая n_e и n_i для $V < 0$, получаем

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -4\pi en_c \left[\left(\frac{V_c}{V} \right)^{1/2} - e^{-\frac{e(V-V_c)}{kT_e}} \right]. \quad (2)$$

Здесь V_c - потенциал на границе ионного слоя пространственного заряда, отсчитываемая по отношению к невозмущенной плазме. Интегрируя (2) с учетом граничных условий $\frac{dV}{dx} = 0$ при $V = V_c$ получаем:

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

Из решения этого уравнения следует, что в околосондовой области формируется слой пространственного заряда [8]. Внутри этого слоя при

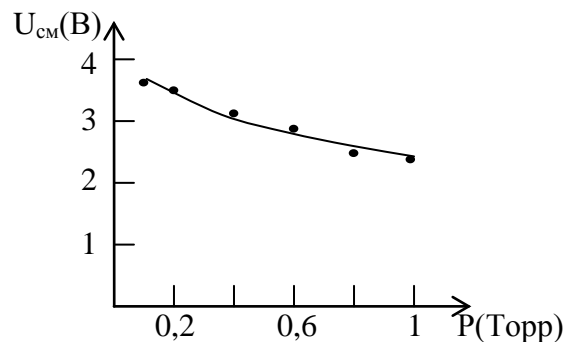


Рис. 2. Зависимость потенциала смещения максимума первой производной зондовой характеристики от давления газа при одинаковой освещенности.

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

$$j = ne\sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} \quad (4)$$

Если теперь заменить металлический зонд на высокоомный полупроводниковый, то зонд не может отобрать от плазмы электронный ток с плотностью, определяемой формулой (4). Сила зондового тока уменьшается, его 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. Следовательно, зная точную форму зондовой характеристики, по значению разности токов при потенциала пространства и измеренного тока полупроводниковым зондом, определяется глубина проникновения поля в полупроводниковый электрод.

Определение потенциала пространства по максимуму первой производной позволяет более точное его определение чем другими способами (например по излому полулогарифмической характеристики). Поэтому приведенные на рис. 2 значения U_{cm} более точно передают зависимость глубину проникновения поля от 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. Лебедева Н.Н., Орбух В.И., Султанов Ч.А. Газоразрядная система с цеолитовым электродом. ЖТФ, 2010, т. 80, с. 134-137.
3. 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.
4. Парицкий Л.Г., Рывкин С.М. Использование полупроводников для осуществления фотографического процесса в длинноволновой области. ФТП. 1970, т.4, с. 764-771.
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. Мурадов А.Х. Проблемы энергетики. Исследование контакта высокоомного полупроводникового зонда с газоразрядной гелиевой плазмой. №1, 2008, с. 106.

7. 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.
8. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971, 543 с.

NEON QAZINDA ELEKTRİK BOŞALMASINA YERLƏŞDİRİLMİŞ YÜKSƏK OMLU YARIMKEÇİRİCİ ZONDUN DİFERENSİAL XARAKTERİSTİKASI

Ə.X.MURADOV

XÜLASƏ

Neon qazında elektrik boşalması plazmasına yerləşdirilmiş müstəvi yarımkeçirici zondun volt – amper xarakteristikasının birinci tərtib törəməsi radiotexnik üsulla ölçülmüşdür. Kənar şüalanmanın təsiri nəticəsində zond cərəyanının şiddətinin kəskin artdığı və birinci tərtib törəmələrin maksimumlarının xarakteristikanın elektron tərəfinə sürüşdüüyü müşahidə edilmişdir. Maksimumların sürüşməsi elektrik sahəsinin yarımkeçirici daxilinə nüfuz etmə dərinliyi kimi interpretasiya edilmişdir. Zondun eyni işıqlandırılması zamanı sürüşmə potensialının qazın təzyiqindən asılılığına əsasən xarakteristikanın sürüşməsinin izahı verilmişdir.

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

DIFFERENTIAL CHARACTERISTICS OF HIGH OHMIC SEMICONDUCTOR PROBE IN A NEON GAS DISCHARGE PLASMA

A.H.MURADOV

SUMMARY

By means of radio engineering, the first derivatives of volt -ampere characteristics of plane semiconductor probe, placed in a neon gas discharge plasma have been measured. It has been obtained that under the influence of external radiation, the probe current drastically increases and the maximums of the first derivatives shift towards the electron part of the characteristics. The shift of maximums is interpreted as the electric field penetrating depth into the semiconductor. The interpretation of shifts is done using the gas pressure dependence of later at the same probe lighting intensity.

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

Redaksiyaya daxil oldu: 18.02.2013-cü il
Çapa imzalandı: 06.03.2013-cü il