

Возникающие при этом радиационные точечные дефекты в кремнии удастся практически полностью устранить в результате последующего отжига по описанной выше технологии. Об этом свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа.

Косвенным свидетельством могут также служить результаты исследований электрофизических характеристик диодов Шоттки на полученных тестовых образцах. Типичные зависимости величины обратного напряжения диодов Шоттки приведены на рис. 2. Некоторое снижение величины обратного напряжения обусловлено влиянием верхнего слоя сплава Al-Si, так как при относительно высоких значениях температуры и времени отжига пленка Mo уже не является совершенным диффузионным барьером. Поэтому требуемые электрофизические свойства и стабильность диодов Шоттки на основе контактов Si/Mo можно обеспечить сочетанием ионной бомбардировки и изотермического отжига при умеренных температурах (до  $\sim 450^{\circ}\text{C}$ ) либо импульсного ИК отжига.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Достанко А.П., Баранов В.В., Шаталов В.В.* Пленочные токопроводящие системы СБИС. Минск, 1989. С. 189–193.
2. *Мьюрарка Ш.* Силициды для СБИС. М., 1986. С. 120–125.
3. *Стриха В.И., Бузанева Е.В.* Физические основы надежности контактов металл–полупроводник в интегральной электронике. М., 1987. С. 202–207.
4. *Dervos C.T., Michaelides J.M.* The Effect of Contact Capacitance on Current-Voltage Characteristics of Stationary Metal Contacts. // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 1998. Part A. Vol. 21. P. 530–540.

*Поступила 08.08.2000*

#### Summary

Some parameters, including bombardment by noble gas ions in conjunction with thermal treatment, that influent on solid-state structures stability have been discussed. The ion-stimulated diffusion of silicon was occurred during the ion bombardment and a stable interface was formed. The required electrical-physical properties and stability of Si/Mo Schottky diodes might be achieved by combining ion bombardment and isothermal annealing at temperatures up to  $\sim 450^{\circ}\text{C}$  or infrared treatment.

---

Ю. М. Рычков, А. Е. Василевич

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНВЕКЦИЯ СЛАБОПРОВОДЯЩИХ ЖИДКОСТЕЙ В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
ул. Ожешко 29, г. Гродно, 230023, Республика Беларусь*

#### Введение

Постоянное усовершенствование систем тепло- и массообмена, работающих в условиях невесомости, требует интенсификации конвекции слабопроводящих жидкостей в электрическом поле. Традиционные пути решения этого вопроса посредством увеличения напряженности электрического поля и подбора состава рабочей жидкости на сегодняшний день уже не дают желаемого результата, что побуждает к поиску новых решений. В качестве одного из них ниже предложен метод интенсификации и управления электрической конвекцией слабопроводящих жидкостей импульсным электрическим полем.

Метод основан на использовании закономерностей молекулярного строения приэлектродного слоя в жидких диэлектриках [1, 2] и регулировании уровня инжекции эмитирующего электрода (катода) за счет импульсного электрического поля дополнительного иницирующего электрода (сетки).

Дополнительный электрод (сетка), выполненный в виде тонкой проволоочки, создающей минимальное гидродинамическое сопротивление для течения жидкости, помещается на границе ионного и кластерного слоев проводимости вблизи катода (в зависимости от типа исследуемой жидкости это расстояние составляет от 50 до 200 мкм). На сетку подается последовательность импульсов напряжения прямоугольной формы регулируемой амплитуды, длительности и частоты. Амплитуда импульса выбирается больше пробивного напряжения участка катод–сетка; длительность импульса – меньше времени, необходимого для установления пробоя. В результате создается униполярный импульсный поток заряда в приэлектродный кластерный слой жидкости с последующим развитием электрической конвекции в поле анода. Управление уровнем инжекции заряда и соответственно электрической конвекцией слабопроводящей жидкости осуществляется регулированием амплитуды и частоты следования импульсов напряжения инициирующего электрода сетки.

### Методика эксперимента

Исследование кинематических характеристик электрической конвекции [3] во всем диапазоне ее существования по шкале напряжений, т.е. от порога возникновения и до пробоя межэлектродного промежутка проводилось в системе электродов типа шар (катод) – проволоочка (сетка) – плоскость (анод) в растворах изобутилового спирта в трансформаторном масле.

Блок-схема экспериментального стенда приведена на рис. 1.

Вопрос визуализации электрической конвекции слабопроводящих жидкостей, очень чувствительных к примесям [3], представляет сложную задачу. Специальные исследования показали, что для этой цели лучше всего подходят газовые пузырьки [4].

Экспериментальная установка позволяет одновременно регистрировать кинематические параметры конвекции и соответствующие им электрические характеристики. Для определения кинематических параметров в исследуемую среду через капилляр К вводятся воздушные пузырьки калиброванного размера (1 мкм). Пространственная визуализация пузырьков осуществляется источником подсветки ИП, создающим световую плоскость шириной 1 мм в межэлектродном промежутке экспериментальной кюветы. Координаты пузырьков и скорость их перемещения определяются путем записи изображения межэлектродного промежутка в реальном времени видеокамерой ВК (MSF-468) через устройство повышения контрастности УПК [5] и видеоадаптер ВА на компьютер IBM PC с последующей кадровой обработкой в специально разработанной программе.

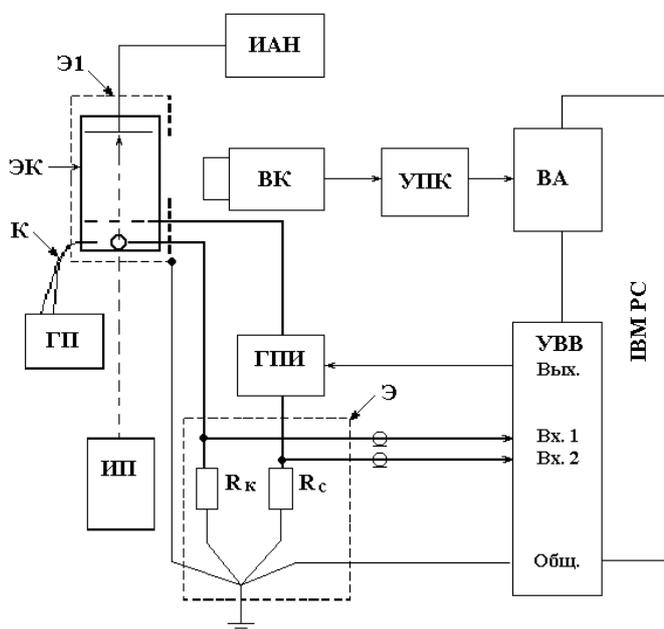


Рис. 1. Блок-схема эксперимента по исследованию электрической конвекции слабопроводящих жидкостей методом стробоскопической визуализации воздушных пузырьков.

Электрическая часть установки состоит из высоковольтного источника анодного напряжения ИАН (0–40 кВ) и программируемого генератора высоковольтных импульсов сеточного напряжения прямоугольной формы ГПИ ( $U_{\text{вых}} = 0–20$  кВ). Длительность и период повторения формируемых высоковольтных импульсов задаются программно ( $\tau = 1 \cdot 10^{-6}–10$  с,  $T = 1 \cdot 10^{-6}–10$  с). Для измерения токов катода и сетки используются эталонные сопротивления  $R_k$  и  $R_c$ . Регистрация значений токов осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) устройства ввода/вывода УВВ (L-783, АЦП 12 бит, 3 МГц,  $R_{\text{вх}} = 1$  МОм, 16 цифровых ТТЛ входов/выходов), установленном в

компьютере IBM PC. Это же устройство формирует прямоугольные импульсы, управляющие работой ГПИ. Для устранения электрических помех экспериментальная кювета и эталонные сопротивления помещены в металлические экраны Э1 и Э2.

Установка позволяет регистрировать поле скоростей в диапазоне  $10^{-4}$ –10 м/с. Погрешность измерения скорости не превышает 10%. Точность измерения токов не превышает 0,1%.

### Результаты измерений

Все проведенные измерения были разделены на три этапа. Целью первого этапа было определение оптимального местоположения иницирующего электрода. Результаты измерения зависимости скорости течения центральной струи конвекции от расстояния катод–сетка приведены на рис. 2.

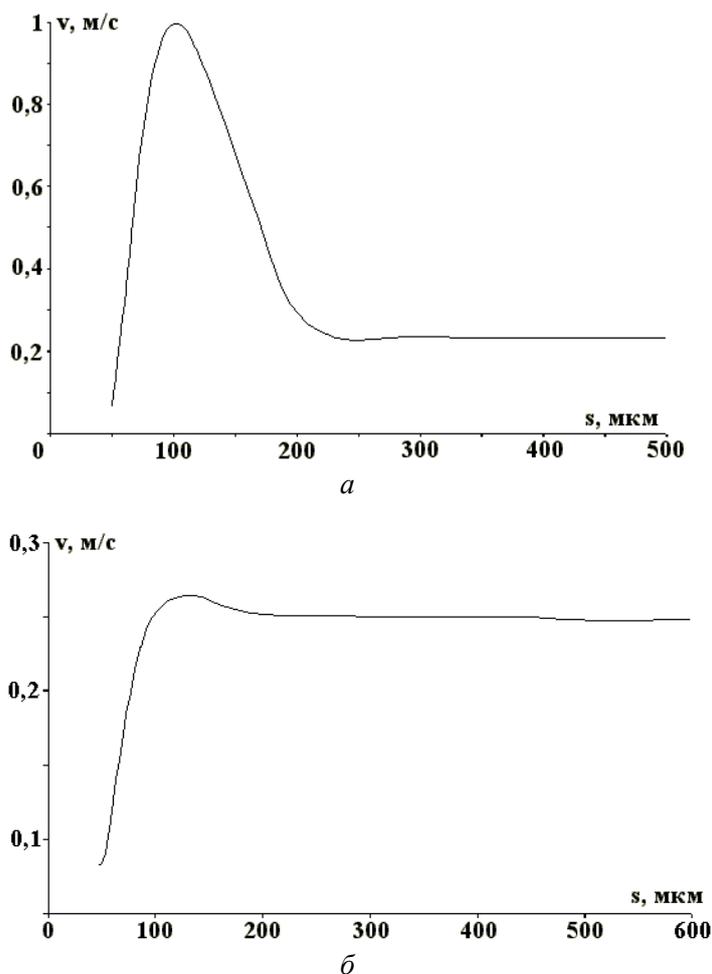


Рис. 2. Зависимость скорости движения центральной струи электрической конвекции от расстояния катод–сетка при постоянном напряжении на сетке. а – 10% раствор изобутилового спирта в трансформаторном масле,  $U_a = 10$  кВ,  $U_c = 2$  кВ; б – 10% раствор изобутилового спирта в трансформаторном масле,  $U_a = 10$  кВ,  $U_c = 6$  кВ,  $T = 30$  мс,  $\tau = 6$  мс,  $s = 100$  мкм.

Оказалось, что для случая постоянного напряжения сетки (рис. 2,а) эта зависимость имеет резко выраженный максимум в районе 100 мкм. В случае импульсного напряжения с этого расстояния наблюдается насыщение. Поскольку данное расстояние по результатам [1, 2] соответствует границе ионного и кластерного слоев проводимости, оно же и является оптимальным для интенсификации инжекционного тока с поверхности катода. В дальнейшем величина расстояния катод–сетка выбиралась в пределах 100–200 мкм.

Целью второго этапа было определение зависимостей скорости центральной струи электрической конвекции от длительности и частоты следования импульсного напряжения на сетке. Результаты измерений приведены на рис. 3.

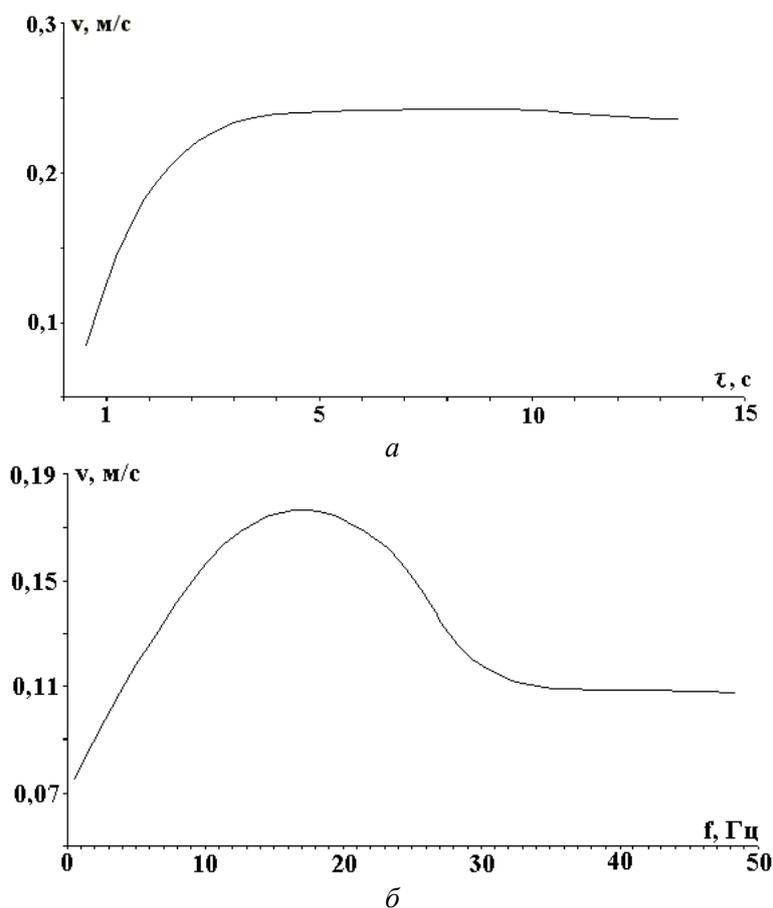


Рис. 3. Зависимость скорости движения центральной струи электрической конвекции от длительности и частоты управляющего импульса. *а* – 10% раствор изобутилового спирта в трансформаторном масле,  $U_a = 10$  кВ,  $U_c = 6$  кВ,  $T = 30$  мс,  $s = 100$  мкм; *б* – 10% раствор изобутилового спирта в трансформаторном масле,  $U_a = 10$  кВ,  $U_c = 6$  кВ,  $T = 30$  мс,  $\tau = 6$  мс,  $s = 100$  мкм.

Оказалось, что зависимость скорости течения от длительности импульса (рис. 3,а) имеет насыщение, начиная с длительности импульса в 5–10 мс. Дальнейшее увеличение длительности импульса сеточного напряжения до 20 мс и более приводит к пробое промежутка катод–сетка. В дальнейшем длительность импульса выбиралась в пределах 5–10 мс.

Оказалось, что зависимость скорости течения от частоты следования импульсов сеточного напряжения (рис. 3,б) имеет максимум в районе 15–23 Гц. На наш взгляд, это соответствует оптимальному соотношению между временем максвелловской релаксации и временем отсутствия импульса напряжения, в течение которого жидкость в промежутке катод–сетка должна возвращаться в свое первоначальное предионизационное состояние.

В дальнейшем частота следования импульсов выбиралась в диапазоне 17–19 Гц.

Целью третьего этапа было изучение зависимости скорости течения центральной струи электрической конвекции от амплитуды импульса сеточного напряжения. Результаты измерений приведены на рис. 4.

Оказалось, что скорость электрической конвекции при амплитудах импульсного сеточного напряжения меньших 4 кВ мало отличается по своей величине от значений, достигаемых в традиционной двухэлектродной системе [4]. При повышении амплитуды напряжения выше 4 кВ начинается резкий рост скорости течений по сравнению с двухэлектродной системой (до 2 порядков по величине), заканчивающийся при 5 кВ. Уровень насыщения здесь, по-видимому, соответствует максимальной возможности слабопроводящей жидкости к молекулярной структуризации и конвективному переносу инжектируемого в нее заряда. Несмотря на то, что теория этого процесса еще находится в стадии разработки [6], обнаруженный эффект уже сейчас дает возможности для создания новых (импульсных) электрогидродинамических преобразователей (ионно-конвекционные насосы, устройства адаптивной оптики, исполнительные устройства микрогидромеханики и т.д.), существенно превышающих по своим характеристикам существующие аналоги.

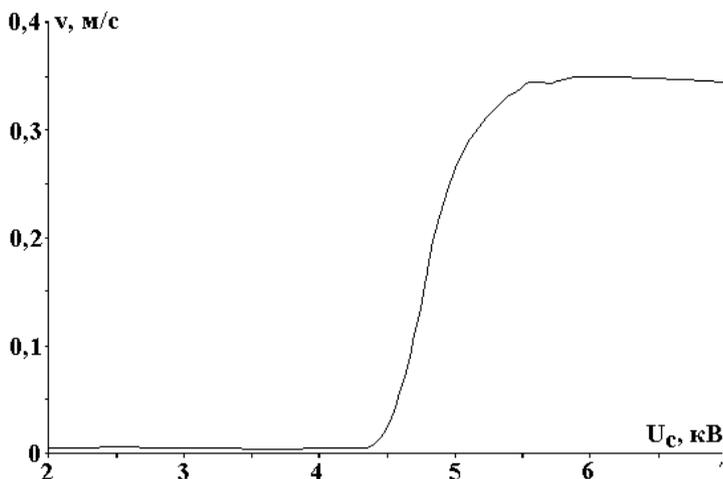


Рис. 4. Зависимость скорости движения центральной струи электрической конвекции от амплитуды импульсов на управляющем электроде (10% раствор изобутилового спирта в трансформаторном масле,  $U_a = 10$  кВ,  $T = 30$  мс,  $\tau = 6$  мс,  $s = 0,1$  мм).

### Выводы

Применение инициирующего импульсного электрического поля позволяет значительно (на два порядка по величине скорости течений) интенсифицировать электрическую конвекцию слабопроводящих жидкостей и управлять ее параметрами.

### Список принятых обозначений:

К – капилляр, ИП – источник подсветки, ВК – видеокамера MSF-468, УПК – устройство повышения контрастности, ВА – видеоадаптер, IBM PC – компьютер, ИАН – источник опорного напряжения, ГПИ – программируемый генератор импульсов,  $R_n$ ,  $R_c$  – эталонные сопротивления, ЭК – измерительная кювета, Э1, Э2 – электрические экраны, ГПИ – программируемый генератор прямоугольных импульсов, УВВ – устройство ввода/вывода, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика, ГП – генератор пузырьков,  $U_{вых}$  – амплитуда выходного напряжения ГПИ,  $U_a$  – напряжение анода,  $U_c$  – амплитуда напряжения на сетке, Вх. 1, Вх. 2 – аналоговые входы устройства ввода/вывода для регистрации токов катода и сетки, Вых. – цифровой выход устройства ввода/вывода для управления ГПИ,  $s$  – расстояние от катода,  $f$  – частота,  $v$  – скорость течения,  $\tau_n$  – время нарастания переднего фронта высоковольтного импульса,  $\tau$  – длительность высоковольтного импульса,  $T$  – период повторения.

### Индексы:

$вых$  – выходное,  $n$  – нарастания,  $и$  – импульса,  $a$  – анодное,  $c$  – сетки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рычков Ю.М., Василевич А.Е. О кинетике образования зарядовых кластеров в слабопроводящих жидкостях // ИФЖ. 2000. Т. 73. № 4. С. 823–826.
2. Рычков Ю.М., Василевич А.Е., Зайкова С.А. Кластерная структура приэлектродного слоя в жидких диэлектриках // ИФЖ. 2000. Т. 73. № 4. С. 827–831.
3. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М., 1979.
4. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., 1989.
5. Василевич А.Е., Мейер П., Ступакевич А.Ю. Устройство повышения контрастности телевизионных изображений // Приборы и техника эксперимента. 1997. № 5. С. 142–144.
6. Полянский В.А., Панкратьева И.Л. Исследование распространения импульса концентрации ионов в неполярной диэлектрической жидкости // Тез. докл. VI Международной науч. конф. “Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей”. Санкт-Петербург, 2000. С. 95–100.

Поступила 10.08.2000

### Summary

The results of experimental studies of electrical convection kinematics of low-conducting liquids subjected to the pulsed electric field are presented. The results of comparative velocity measurements of central stream using original three electrodes and traditional two electrodes scheme are discussed.