

**СЕКЦИЯ 6**  
**СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ**

**SECTION 6**  
**ADVANCES IN EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES**

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ  
ПОЛЕЙ В ЛЕКЦИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Н.И. Горбачук<sup>1)</sup>, Л.И. Буров<sup>1)</sup>, Н.А. Поклонский<sup>1)</sup>, Д.С. Неверов<sup>1)</sup>, С.В. Шпаковский<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь,  
gorbachuk@bsu.by, burov@bsu.by, poklonski@bsu.by, neverovds@mail.ru*

<sup>2)</sup> *ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
ул. Казинца 121А, 220108 Минск, Беларусь shpaks@tut.by*

Разработано устройство для демонстрации электростатических полей заряженных тел в лекционных экспериментах по дисциплине «Электричество и магнетизм». Схема построена на минимальной элементной базе и может использоваться при проведении занятий по дисциплинам, связанным с радиоэлектроникой и физикой полупроводниковых приборов. В отличие от известных устройств подобного типа, функционирующих на базе полевых транзисторов с управляющим  $p-n$ -переходом, работа предлагаемого устройства основана на эффекте накопления заряда емкостью затвор-исток МОП-транзистора (транзистора металл-оксид-полупроводник) с индуцированным  $n$ -каналом. Его использование позволяет осуществить наглядную индикацию присутствия электрического поля через включение и модуляцию яркости свечения светодиода. Дополнительной отличительной особенностью устройства является включение в цепь затвора обратно-смещенного фотодиода. Изменение величины его обратного тока при варьировании освещенности позволяет управлять скоростью заряда-разряда емкости затвор-исток, осуществляя демонстрацию эффекта фото-ЭДС в случае использования макета в лекционном эксперименте дисциплин специализации.

**Ключевые слова:** МОП-транзистор; электрическое поле; лекционный эксперимент; фотодиод.

**DEVICE FOR DEMONSTRATION OF ELECTROSTATIC FIELDS  
IN A LECTURE EXPERIMENT**

N.I. Gorbachuk<sup>1)</sup>, L.I. Burov<sup>1)</sup>, N.A. Poklonski<sup>1)</sup>, D.S. Neverov<sup>1)</sup>, S.V. Shpakovski<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus*

<sup>2)</sup> *JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,  
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus,*

It has been developed the device to register the electrostatic fields of charged bodies, which can be used in demonstration experiments in lectures on the courses «Electricity and Magnetism», «Introduction to solid-state electronics», «Basics of radio electronics» and any other special courses related to the physics of semiconductor instruments. The device's layout uses a minimal elemental base. Unlike known devices of this type, operating on the basis of field transistors with a control  $p-n$ -transition, the device's operation is based on the effect of accumulating a charge with the capacity of the shutter-source MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) with induced  $n$ -channel. The scheme includes an MOSFET, an LED (Leigh Emitted Diode), a photodiode and a current-limiting resistor. The application of an MOSFET with an induced channel allows to display a visual indication of an electric field presence. The electrostatic field change is tracked by the change in the brightness of the LED glow. The device allows to demonstrate the effects of the superposition of electrostatic charging fields of opposite signs and the capacitance dependence the dielectric permeability of the environment. An additional distinctive feature of the device is the inserting in the circuit of the shutter back-shifted photodiode. Changing the value of its reverse cur-

rent in the variation of illumination allows you to control the charge-discharge rate of the shutter-source capacity, demonstrating the effect in the case of the use of the layout during the lecture.

**Keywords:** MOSFET, transistor; electric field; lecture experiment; photodiode.

## Введение

Несмотря на широкие возможности современных компьютерных технологий, позволяющих проводить численное моделирование любых явлений электро- и магнитостатики и использовать результаты моделирования для организации интерактивных занятий, традиционный лекционный эксперимент продолжает играть важную роль в подготовке специалистов [1-3]. Проведение демонстраций во время лекционных занятий обеспечивает максимальную вовлеченность студентов как в ход подготовки эксперимента, так и в процесс наблюдения и регистрации физических эффектов, что невозможно при использовании только видеоматериалов и результатов компьютерного моделирования [1]. Однако существуют области классической физики, для которых прямое наблюдение явлений является весьма затруднительным. Это в значительной мере относится к наблюдению и регистрации электрических и магнитных полей.

Демонстрационный эксперимент продолжает также оставаться важной составляющей профориентационной работы среди учащихся общеобразовательных школ — будущих абитуриентов естественнонаучных факультетов [3].

Цель работы — разработать устройство регистрации электростатических полей заряженных тел, для использования в лекционных экспериментах.

## Аналоги

Наиболее точными приборами, предназначенными для измерения электростатических полей, являются выпускаемыми промышленностью измерители вибрационного типа и приборы, основанные на спектральном анализе сигнала датчика, помещенного в электростатическое поле [4, 5].

Измерители вибрационного типа содержат [4] чувствительный и экранирую-

щий электроды. Экранирующий электрод за счет электромеханического привода колеблется с частотой генератора, изменяя при этом степень электростатической связи чувствительного электрода с исследуемым электрическим полем, благодаря чему на чувствительном электроде наводится переменный электрический заряд, пропорциональный напряженности электрического поля. Наведенный заряд затем преобразуется усилителем, синхронным детектором и фильтром нижних частот в постоянное напряжение, величина которого пропорциональна напряженности измеряемого электрического поля, а знак — его полярности.

В приборах, использующих спектральный анализ сигнала датчика [5], форму и скважность выходного сигнала модулятора выбирают с возможностью селекции одной из кратных гармоник сигнала, лежащей за пределами полосы электромагнитных помех.

Указанные приборы позволяют проводить измерения электростатического поля с достаточно высокой точностью, однако дороги и не обеспечивают наглядность в проведении лекционного эксперимента.

Прямую демонстрацию эффектов, вызванных присутствием электростатического поля, можно проводить с использованием простейшего оборудования: электростатических султанов и взвеси диэлектрического порошка в масле [6, 7]. Однако, данные эксперименты не позволяют получать количественную оценку напряженности электростатического поля. Использование электроскопов удовлетворяет требованиям демонстрационного эксперимента, однако их конструкция в целом является достаточно громоздкой и на настоящий момент выглядит архаично.

## Прототип

Наиболее близкими к целям и задачам современного демонстрационного экспе-

риumenta являются индикаторы электростатического поля, работа которых основана на использовании полевых транзисторов с управляющим  $p-n$ -переходом в качестве чувствительного элемента (датчика) [8]. Электрические схемы подобных приборов могут быть рассчитаны на работу транзистора как на т.н. пологом, так и на линейном участке выходной характеристики. Для индикации изменения тока используются светодиоды.

Простейшая известная схема индикатора подобного типа приведена на рисунке 1 [8]. Схема содержит всего три элемента: полевой транзистор VT1, выполняющий функцию датчика электростатического поля, светодиод HL1, играющий роль индикаторного элемента, и стабилитрон VD1, служащий для защиты полевого транзистора от пробоя. В качестве антенны может использоваться отрезок провода длиной 10-15 см. При наличии поля сопротивление канала исток-сток полевого транзистора возрастает. Это приводит к уменьшению тока через светодиод HL1. Соответственно, индикация поля осуществляется по уменьшению яркости его излучения.

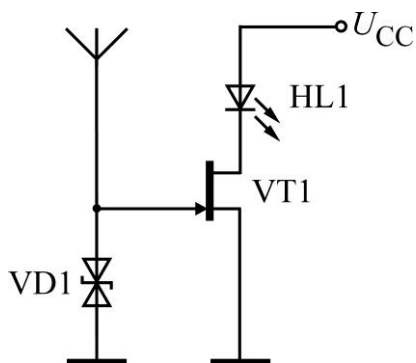


Рис. 1. Схема индикатора электростатического поля на транзисторе с управляющим  $p-n$ -переходом и светодиоде  
Fig. 1. Diagram of an electrostatic field indicator on a JFET (Junction Field Effect Transistor) and LEDs

Устройство, показанное на рис. 2 [8], отличается от представленного на рис. 1 использованием для индикации трех светодиодов. В отсутствии поля ток протекает преимущественно через индикаторный светодиод HL1. При наличии поля сопро-

тивление канала исток-сток полевого транзистора возрастает. При этом увеличивается ток в цепи, содержащей последовательно соединенные ограничивающий резистор R1 и светодиоды HL2 и HL3, что при определенной величине тока вызывает их свечение [8]. Таким образом, данная схема обеспечивает увеличение яркости излучения светодиодов HL2 и HL3 в присутствии электростатического поля.

Отметим, что для защиты полевого транзистора, как правило, используется симметричный стабилитрон, с напряжением стабилизации около 10 В. В том случае, когда из схемы исключается стабилитрон возрастает чувствительность индикатора, однако увеличивается риск повреждения полевого транзистора. Стабилитрон может быть заменен резистором с сопротивлением 10-30 МОм.

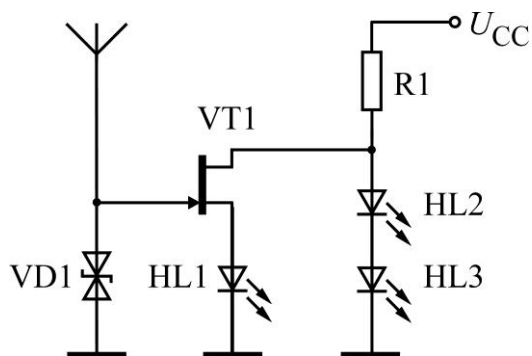


Рис. 2. Схема индикатора электростатического поля на транзисторе с управляющим  $p-n$ -переходом и нескольких светодиодах  
Fig. 2. Diagram of an electrostatic field indicator on a JFET and several LEDs

### Описание устройства

Нами разработано устройство для демонстрации электростатических полей заряженных тел в лекционных экспериментах по дисциплине «Электричество и магнетизм». Схема построена на минимальной элементной базе и может использоваться при проведении занятий по радиоэлектронике и физике полупроводниковых приборов.

Схема устройства представлена на рисунке 3. В отличие от описанных выше устройств нами предлагается использо-

вать в качестве датчика электростатического поля МОП-транзисторы с индуцированным каналом. Например, МОП-транзисторы с каналом *n*-типа. В предлагаемой схеме (рис. 1) МОП-транзистор VT1 используется в качестве датчика электрического поля, светодиод HL1, выполняет функцию индикаторного элемента. Для защиты МОП-транзистора применяется фотодиод VD1. Резистор R1 создает отрицательную обратную связь.

При отсутствии электростатического поля транзистор закрыт, тока через светодиод нет. Появление электростатического поля за счет индукции заряда на затворе МОП-транзистора заряжает емкость за-

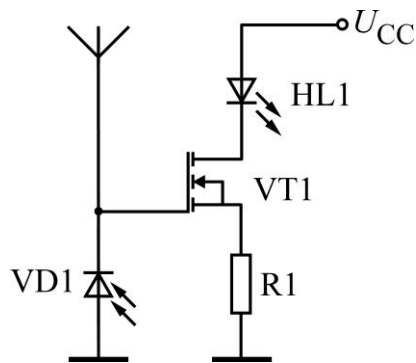


Рис. 3. Схема индикатора электростатического поля на МОП-транзисторе  
Fig. 1. MOSFET electrostatic field indicator circuit

твор-исток. При превышении напряжения над пороговым значением формируется инверсионный канал. В цепи резистор – исток – сток – светодиод начинает протекать ток, вызывая свечение светодиода.

Использование резистора R1 снижает «чувствительность» устройства, однако, позволяет эффективнее применять в демонстрационных целях модуляцию яркости светодиода и заменять в экстренном случае источник питания на другой с иным напряжением.

Используемый для защиты транзистора фотодиод VD1 включен в обратном направлении. Величину его фототока, а значит и динамического сопротивления, можно регулировать, меняя интенсивность освещения (затемняя или, наоборот, проводя дополнительную засветку).

Итак, предлагаемое нами использова-

ние МОП-транзисторов в качестве чувствительных элементов позволяет проводить индикацию наличия электростатического поля не по ослаблению излучения светодиода (как в схеме на рис.1), а по его возникновению. При этом, большему значению напряженности электростатического поля будет соответствовать более интенсивное свечение индикаторного светодиода. С точки зрения обеспечения наглядности в демонстрационном эксперименте это предпочтительнее. Особенно если аудитория — учащиеся школ. По отношению к схеме, представленной на рисунке 2, предлагаемая нами схема содержит меньшее количество элементов. В случае ее дополнения комплементарным МОП-транзистором и еще одним светодиодом, схема позволит проводить непосредственную индикацию электростатических полей, создаваемых зарядами различного знака.

### Возможные эксперименты и области использования устройства

1) Аудитории кратко описывается принцип работы прибора. Демонстрируется прибор и указывается на отсутствие свечения индикаторного светодиода при отсутствии внешнего электростатического поля. Трением заряжается полоска из полиметилметакрилата и демонстрируется включение светодиода в присутствии электростатического поля. Демонстрируется зависимость яркости свечения светодиода от расстояния до заряженного тела.

2) Трением заряжается полоска из полиметилметакрилата и демонстрируется включение светодиода в присутствии электростатического поля. Трением заряжается полоска из полистирола и демонстрируется снижение интенсивности свечения светодиода, возникающее за счет суперпозиции электростатических полей от тел, имеющих заряды различного знака. Демонстрируется зависимость яркости свечения светодиода от расстояния до заряженных тел различного знака и от их расположения относительно антенны

устройства.

3) Трением заряжается полоска из полиметилметакрилата и демонстрируется включение светодиода в присутствии электростатического поля. Между антенной устройства и заряженным телом помещается сосуд, заполненный водой (или любой другой предмет). Демонстрируется снижение яркости свечения светодиода при уменьшении емкости.

Описанные эксперименты могут демонстрироваться на лекционных занятиях по дисциплине «Электричество и магнетизм». Кроме того, наличие наглядной зависимости между электростатическим полем и включением МОП-транзистора с индуцированным каналом, а также зависимость скорости разряда емкости затвористок от тока фотодиода позволяет использовать устройство в лекционных экспериментах по дисциплинам «Введение в твердотельную электронику», «Основы радиоэлектроники» и дисциплинам специализации, связанным с физикой полупроводниковых приборов.

Разработанный макет устройства может служить основой для создания индикаторов, используемых в промышленности для дистанционного определения наличия электрических полей высокой напряженности.

### Заключение

Разработано устройство для регистрации электростатических полей заряженных тел в лекционных экспериментах по дисциплине «Электричество и магнетизм». Схема построена на минимальной элементной базе и может использоваться при проведении занятий по радиоэлектронике и физике полупроводниковых приборов.

### Библиографические ссылки

1. Наумчик В.Н., Ярошенко Т.А. Физика и техника в демонстрационном эксперименте: очерки истории. Минск: РИПО; 2017. 262 с.

2. Грабовский М.А., Млодзеевский А.Б., Телеснин Р.В., Шаскольская М.П., Яковлев И.А. Лекционные демонстрации по физике. Москва: Наука; 1972. 640 с.
3. Азимов А. Популярная физика. Москва: ЗАО Центрполиграф, 2006. 752 с.
4. Филиппов А.Н., Пушкин Н.М. Лакшин К.В. Измеритель напряженности электрического поля вибрационного типа. Патент RU 2647225C1. Оpubл. 14.03.2018.
5. Тетерин Е. П., Анисимова С. А., Тетерин П. Е., Лукичева В. К. Способ измерения напряженности электростатического поля Патент RU 2672527C1. Оpubл. 15.11.2018.
6. Бурсиан Э.В. Физические приборы. Москва; Просвещение. 1984. 271 с.
7. Джанколи Д. Физика: В 2-х т. Т.2. Москва: Мир; 1989. 667 с.
8. Шустов М. Индикатор электростатического поля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://radiopolyus.ru/sxemy-dlya-izmerenij/93-indikator-elektrostaticheskogo-polya>

### References

1. Naumchik V.N., Yaroshenko T.A. Fizika i tekhnika v demonstratsionnom eksperimente: ocherki istorii [Physics and technology in a demonstration experiment: essays on history]. Minsk: RIPO; 2017. 262 p. (In Russian).
2. Grabovskiy M.A., Mlodzeevskiy A.B., Telesnin R.V., Shaskolskaya M.P., Yakovlev I.A. Lektsionnyye demonstratsii po fizike [Lecture demonstrations in physics]. Moscow: Science; 1972. 640 p. (In Russian).
3. Asimov I. Understanding physics. New York: Buccaneer Books, 1988. 496 p.
4. Filippov A.N., Pushkin N.M. Lakshin K.V. Izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo polya vibratsionnogo tipa [Vibration-type electric field strength meter]. Patent RU 2647225C1. Publ. 03.14.2018. (In Russian).
5. Teterin E.P., Anisimova S.A., Teterin P.E., Lukicheva V.K. Sposob izmereniya napryazhennosti elektrostaticheskogo polya [Method for measuring the intensity of the electrostatic field]. Patent RU 2672527C1. Publ. 11.15.2018. (In Russian).
6. Bursian E.V. Fizicheskiye pribory [Physical devices]. Moscow; Education. 1984. 271 s. (in Russian).
7. Giancoli Douglas C. General Physics. Charlottesville: Prentice-Hall. Inc; 1984. 888p.
8. Shustov M. Indikator elektrostaticheskogo polya [Indicator of electrostatic field] [Electronic resource]. - Access mode: <http://radiopolyus.ru/sxemy-dlya-izmerenij/93-indikator-elektrostaticheskogo-polya>. (In Russian).