

К ВОПРОСУ О СВЕЧЕНИИ ЖИДКИХ И ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

А. А. ВОРОБЬЕВ и В. Д. КУЧИН

Современные теории высоковольтной электропроводности и электрического пробоя твердых диэлектриков исходят из предположения об увеличении концентрации электронов в зоне проводимости при высокой напряженности поля. Возрастание концентрации электронов в зоне проводимости может происходить путем ударной, электростатической и термической ионизаций, облегченных сильным электрическим полем. Обратный переход электронов в основную зону или на уровни неоднородностей может сопровождаться излучением энергии [1]. Излучение полупроводников люминофоров в сильном электрическом поле известно, хотя и мало изучено [2, 3, 4, 5].

Наблюдаемое синее и ультрафиолетовое излучения полупроводников под действием высокого напряжения относили за счет разрядов в воздушных включениях или по поверхности полупроводника. Г. Дестрио [2] показал, что свечение разряда в пузырьке воздуха, находящегося в фосфоре, отличается по цвету от свечения самого фосфора. При возбуждении фосфора переменным напряжением максимум яркости свечения диэлектрика не совпадает с максимумом яркости свечения газового разряда и с максимумом напряжения.

Д. Кюри [3, 4] нашел, что электролюминесценция связана с перемещением электронов в зоне проводимости под действием сильного электрического поля.

Ф. Матосси [5] распространил на явление электролюминесценции схему механизма возникновения люминесценции при переходах электронов между заполненной зоной, зоной проводимости и уровнями прилипания.

П. Гудден и Поль [6] наблюдали усиление люминесценции сернистого цинка в сильном электрическом поле. Электроны, ускоренные электрическим полем E , накапливают на длине пробега λ энергию $\omega = eE\lambda$, достаточную для освобождения электронов из ловушек. Опыты Ж. Маттлер и Д. Кюри [7] с $ZnSCu$ показали, что электрическое поле 42 кВ/см освобождает электроны с энергией закрепления $0,75 \text{ эВ}$.

Г. Дестрио [8] установил, что в переменном поле с напряженностью $0,1—1,0 \text{ МВ/см}$ при частоте $10—10000 \text{ гц}$ сульфиды, вольфраматы, силикаты, германаты и другие люминофоры обнаруживают свечение видимым светом. Некоторые люминофоры усиливают яркость фосфоресценции в электрическом поле после предварительного облучения ультрафиолетовым излучением.

Диэлектрический коэффициент электролюминесцирующего фосфора $ZnS_{0,8}Se_{0,2}$ Su значительно изменяется при его освещении и изменении величины напряженности электрического поля, приложенного к образцу. При испытаниях в темноте изменения диэлектрического коэффициента в зависимости от напряженности поля не обнаружено [9].

При приложении напряжения отрицательной полярности к зеленому кристаллу карборунда вблизи острия, подводящего напряжение, образовалось хорошо очерченное зеленое светящееся пятно площадью около 1 мм^2 . Приложение напряжения положительной полярности к образцу после снятия напряжения отрицательной полярности вызывает исчезновение зеленого и появление желтого свечения в кристалле. С увеличением приложенного напряжения отрицательной полярности появляются яркие голубовато-белые пятна, причем вольтамперная характеристика изменяется: ток начинает расти значительно быстрее по сравнению с изменением напряжения [10].

По результатам изучения спектров поглощения и фотопроводимости в кристаллах щелочно-галогидных солей считают, что переход электронов из зоны проводимости в основную зону может сопровождаться излучением квантов с энергией до 10 эв [6]. Наблюдение излучения электронов проводимости в диэлектриках при захвате их ловушками и переходах в другие состояния с меньшей энергией в сильном электрическом поле могло бы помочь в понимании физических явлений перед пробоем.

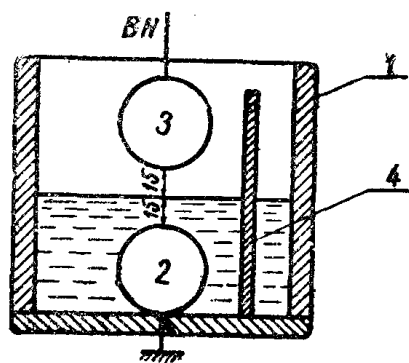


Рис. 1. 1—камера с окнами из каменной соли, 2—шаровые электроды, 3—фотопленка.

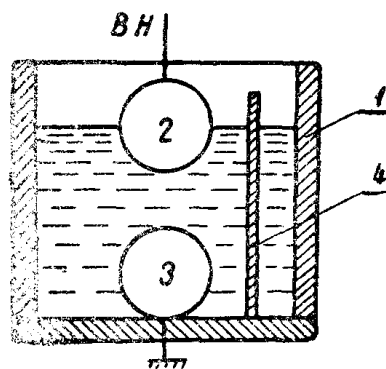


Рис. 2. Обозначения те же, что и на рис. 1.

Нами были поставлены опыты по наблюдению свечения жидких диэлектриков и их поверхностей в сильных электрических полях. При расположении электродов, как это указано на рис. 1, поверхность трансформаторного масла начинала слабо светиться белым светом, когда расчетная напряженность поля на границе двух сред: трансформаторное масло—воздух достигала 13 кв/см . При приложении к электродам переменного напряжения поверхность масла начинает сильно колыхаться и капли масла попадают на поверхность верхнего электрода, где они вытягиваются в направлении поля и интенсивно коронируют. Заряд с капель, растекаясь по поверхности масла, вызывает слабое ее свечение. Пробой воздушного промежутка происходил при расчетной напряженности поля на границе двух сред, равной $16,6 \text{ кв/см}$.

Слабое свечение поверхности раздела масло—воздух наблюдалось, когда напряженность поля достигала 28 кв/см при расположении электродов, как показано на рис. 2. С увеличением напряженности поля свечение усиливается. Свечения масла в межэлектродном промежутке при этом не наблюдалось. Фотопленка, помещенная, как указано на рис. 2, засвечивается при расчетной напряженности поля, $3,3 \text{ кв/см}$. Чувствительность пленки составляла 130 ед. по ГОСТу. Коронирования электродов в этих опытах не наблюдалось. Слабое свечение поверхности масла и засвечивание фотопленки происходит за счет растекания заряда по поверхности. В неравномерном поле (острие против шара) в трансформаторном масле

появляется корона при напряженности поля $2,6 \text{ кв/см}$. Коронирование электрода в масле сопровождается розоватым свечением области, прилегающей к коронирующему электроду. На импульсах и постоянном напряжении положительной и отрицательной полярностей при напряженностях поля вплоть до пробивного свечения трансформаторного масла, ксилола, спирта, воды замечено не было, хотя корона в неравномерном поле имела место.

Мы пытались обнаружить электролюминесценцию и электрофотолуминесценцию образцов из полистирола, плексигласа и кристаллов NaCl , KCl , KBr в сильных полях.

Образец готовился следующим образом. В куске диэлектрика (1) (на рис. 3) размерами $55 \times 55 \times 110 \text{ мм}$ засверливалось два отверстия (2): одно диаметром $8 \div 12 \text{ мм}$ и продолжающее его отверстие (3) диаметром $0,8 \div 0,12 \text{ мм}$, заканчивающееся полусферой (4). В углубление (3) заливался насыщенный раствор соли в воде или спирте, служивший одним из электродов. Вторым электродом служила графитированная или металлизированная плоскость (5). Напряжение к электроду (3) подводилось по проводнику (6), покрывавшему внутреннюю поверхность стеклянной трубки высотой до 400 мм , диаметром $8 \div 11 \text{ мм}$ (7), вставленной в образец. При условии хорошего уплотнения между стенками образца и трубки таким проводником мог служить жидкий электролит или ртуть. Пространство (8) между стенками стеклянной трубки и стенками образца заполнялось порошком TiO_2 , смешанным с касторовым маслом. Обмазка такой пастой краев отверстия (9) значительно повышала напряжение коронирования этих участков. Проводник (10) присоединялся к источнику высокого напряжения.

Конструкция образца, представленная на рис. 1, позволила получить максимальную напряженность электрического поля для NaCl от 1 до $1,63 \text{ Мв/см}$ и имела высокое значение напряжения коронирования (до 100 кв). Максимальная напряженность поля на конце острия определялась по формуле:

$$E = \frac{U}{r \epsilon} \text{ кв/см},$$

где U — приложенное напряжение,

ϵ — диэлектрический коэффициент каменной соли и

r — радиус сферы, измерявшийся при помощи микроскопа с окулярной шкалой.

Максимальная напряженность поля во время опытов с кристаллами каменной соли достигала значения от 0,7 до $1,3 \text{ Мв/см}$. Исследуемый образец находился в трансформаторном масле, ксилоле или воздухе. Свечение поверхности жидких диэлектриков в сильных электрических полях заставило нас отказаться от наблюдения излучения твердых диэлектриков при погружении их в жидкость. Поэтому в наших опытах образец находился в воздухе. Применялось постоянное, переменное или импульсное ($0,5/50 \text{ мксек}$) напряжение. Ожидаемое излучение образца пытались обнаружить визуально, фотографически или счетчиком квантов.

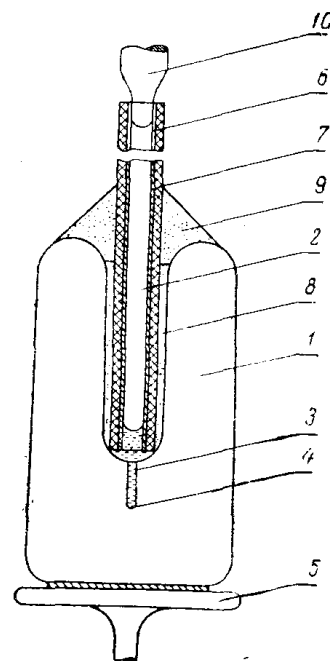


Рис. 3. Конструкция образца.

В сильном равномерном и неравномерном поле наблюдалось свечение кристаллов NaCl, KCl, KBr видимым светом, засвечивающим фотопленку, в которую заворачивался образец. Чувствительная фотопленка прикладывалась к поверхности образца или располагалась от нее на разных расстояниях (рис. 4). Для фиксации рентгеновского излучения фотопленка помещалась в кассету, непрозрачную для видимого света.

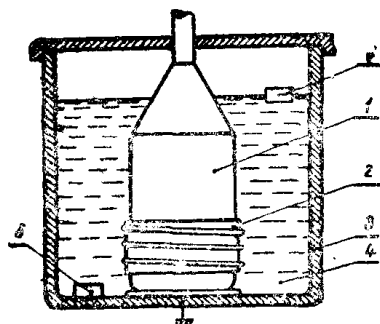


Рис. 4. 1—образец, 2—фотопленка, 3—светонепроницаемая камера, 4—изолирующая жидкость, 5—фотопленка, 6—светонепроницаемая кассета с фотопленкой.

Возможность засвечивания фотопленки за счет коронирования подводящих проводов, образца и поверхности жидкости, утечки тока по поверхности образца была исключена. Усиление видимого свечения кристаллов с F-центрами и примесями исключает применение фоторегистрации ожидавшегося нами излучения примесных диэлектриков в сильном электрическом поле.

С помощью фотопленки мы рентгеновского излучения твердых диэлектриков в сильных полях не обнаружили. Для фиксации квантов ожидаемой электролюминесценции диэлектриков применялся [8, 9] счетчик квантов, имевший нижнюю границу чувствительности около 3000Å . Чувствительность счетчика квантов с уменьшением длины волны уменьшалась. Он не считал излучение от короны в воздухе.

Е. К. Завадовская [12] с помощью счетчика квантов установила слабое ультрафиолетовое излучение кристаллов, вызванное действием γ -излучения. В. А. Кудрявцева и другие [13] с помощью счетчика квантов изучали ультрафиолетовую флюоресценцию рентгенизованной каменной соли.

Для наблюдения ожидаемого излучения диэлектриков в сильном электрическом поле в ультрафиолетовой области спектра мы применили счетчик и установку типа Б. В табл. 2 представлен относительный коэффициент прозрачности для различных материалов. Источником ультрафиолетового излучения служила ртутно-кварцевая лампа и кварцевая лампа ПРК-4 со спектром от 2400 до 6500Å .

Таблица 1

№ пп	Название вещества	Относительный коэффициент прозрачности
1	Воздух	1 (условно)
2	Каменная соль толщина $5 \div 20$ мм	0,987
3	Квари	0,8
4	Спирт	0,43
5	Плексиглас 4 мм	0,36
6	Слюда мусковит 40 микрон	0,07
7	Стекло 2 мм	0,0
8	Ксилол	0,0
9	Железо 1 мм	0,0

Вследствие значительного поглощения ультрафиолетового излучения различными материалами наблюдения электролюминесценции твердых диэлектриков производились в воздухе.

Для наблюдения излучения кристаллов счетчик квантов устанавливался на расстоянии 32 мм от образца и меньше. Показания счетчика определялись при различных напряжениях на образце, а также одновременном освещении его видимым или ультрафиолетовым светом. Освещение производилось лучом параллельно или перпендикулярно оси трубки счетчика. Строилась зависимость показаний счетчика от времени для различных условий опыта. Учитывая высвечивание кристаллов, содержащих F -центры, под действием поля, нагревания и освещения, определение показаний счетчика при освещении образца и данной напряженности поля на нем чередовались с определением показаний счетчика в отсутствие кристалла и т. д. При напряженностях поля до 88% от пробивного с помощью счетчика квантов мы не наблюдали излучений твердых диэлектриков, обусловленных наличием электрического поля высокой напряженности.

В теории люминесценции известны переходы электронов из зоны проводимости в основную зону или на уровни прилипания путем безизлучательных переходов. Предполагают, что в этом случае электрон передает свою энергию решетке при столкновении с фононами относительно малыми порциями — меньше 0,1 эв. Э. И. Адирович [14] указывает, что в нелюминесцирующих кристаллах вероятность безизлучательных электронных переходов превосходит переходы, сопровождающиеся излучением. Результаты наших опытов по наблюдению люминесценции кристаллов в сильных полях находятся в согласии с представлениями теории безизлучательных переходов электронов.

Пользуясь случаем, мы выражаем благодарность доц. Ф. И. Вергунас и доц. Е. К. Завадовской, советы которых при постановке опытов и консультации при обсуждении вопросов, затронутых в работе, были для нас ценными.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Зингерман. УФН, 46, 4, 450, 1952.
2. G. Destriau. J. Phys. Rad. 14, 307, 1953.
3. D. Curie. J. Phys. Rad. 14, 510, 1953.
4. D. Curie. J. Phys. Rad. 14, 672, 1953.
5. F. Matossi. Phys. Rev. 92, 846, 1953; 99, 1100, 1955.
6. P. Gudden. Leichtelektrische Erscheinungen, Berlin, 1928.
7. D. Curie. Arbeitstagung Festkörperphysik, 119, 1952.
8. Destriau. Phyl. Mag. 38, 700, 1947.
9. S. Roberts. JOSA. 43, 7, 590, 1953.
10. K. Lehovec, C. A. Accardo and E. Jamgochian. Phys. Rev. 89, 20, 1953.
11. А. А. Воробьев. Труды Сиб. ФТИ, 3, 2, 3, 1935.
12. Е. К. Завадовская. Труды Сиб. ФТИ, 4, 3, 98, 1936.
13. В. А. Кудрявцева. ЖЭТФ, 4, 710, 1934.
14. Э. И. Адирович. Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов ГТТИ, 1951.