РЕФЕРАТЫ

МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ДИЭЛЕКТРИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ *

В области внутреннего фотоэффекта Гуддену принадлежат многочисленные и очень тщательные работы. Систематические исследования в этой области — если не считать некоторых отдельных работ, появившихся ранее, — ведутся примерно с 1920 г. За этот малый срок накопился, однако, богатый и весьма отчетливый экспериментальный материал, ждущий теоретического оформления.

Вопрос можно ставить шире: дело идет о механизме электронной проводимости неметаллического происхождения.

Для металлов мы имеем сейчас сравнительно хорошо разработанную картину проводимости, основанную на представлении об электронном газе. Физическая модель — металлическая решетка, плавающая в электронном газе — была предложена Друде уже довольно давно и в основных своих чертах сохранилась до сих пор. Прикосновение волновой механики, появление которой ознаменовалось таким бурным расцветом металлофизики коснулось не столько физической модели, сколько методов ее математического описания.

С другой стороны, 25-летние работы школы А. Ф. Иоффе в общих чертах раскрыли перед нами механизм ионной проводимости в монокристаллических диэлектриках. Здесь мы имеем решетку с некоторой плотностью „пустых“ узлов и некоторое количество свободных ионов, вырванных из решетки и странствующих по кристаллу (Zwischengitter-

* Реферат статьи B. Gudded, Über Leitungs-und Photoelekronen in Isolatoren und Halbleitern, Physik. Zeitschrift 21, 1931.

*

raum Френкеля), или, согласно другой картине (Хевеши, Браунбек), движущуюся ионную цепочку, движение которой выражается спонтанным перескакиванием иона с одного узла решетки непосредственно на соседний „пустой“ узел. Ряд работ Гохберга установил в области кристаллов справедливость закона Ома (с учетом поляризации), и этим самым понятие удельной электропроводности в этой области сохранило свой обычный смысл.

Между этими двумя довольно наглядными картинами (электронная проводимость в металле и ионная проводимость в монокристаллическом диэлектрике) находится область гораздо более туманная: электронная проводимость в диэлектрике, вызванная действием света.

В реферируемой обзорной статье Гудден рассматривает два вопроса: 1) каков механизм фотопроводимости в диэлектрике (в полупроводнике)? 2) каким образом и в каких именно местах кристалла влияние света приводит к высвобождению электронов?

В диэлектрике электронная проводимость имеет, повидимому, совершенно особый характер, не имеющий ничего общего с картиной электронной проводимости, построенной нами для металлов. В связи с этим те критерии по которым мы привыкли отличать электронную проводимость от ионной (например, знак температурного коэфициента электропроводности), требуют здесь пересмотра и могут привести к ошибкам. Единственные критерии, остающиеся достойными доверия, это холл-эффект для электронной проводимости и перенос материи — для ионной.

Прежде всего, чтобы дать хотя бы приблизительный ответ на первый вопрос, поставленный Гудденом, напомним известные результаты его предыдущих работ. Представим себе кристалл, зажатый между двумя плоскими параллельными электродами. Схема установки весьма проста: катод соединен с батареей, анод — с землей через гальванометр. При освещени кристалла в течении времени t гальванометр давал отклонение I которое, согласно Гуддену и Полю (1921) можно было представить в виде.

$$I = I_p t + I_s t^2$$

I_p — был назван „первичным“ током, I_s — „вторичным“. Первичный ток, в свою очередь, распадается на „отрицательный“ первичный ток и „положительный“ первичный ток или, в новой терминологии, Einsatzstrom и Ersatzstrom.

Электроны, высвобождаемые светом и уходящие к аноду, образуют „отрицательный“ ток. Они оставляют за собой положительные ионы, которые придают кристаллу общий положительный потенциал и ослабляют внешнее поле. Это приводит к ослаблению фототока („отрицательного“ тока) и может привести к его полному уничтожению. Чтобы избежать этого искажающего влияния положительных объемных зарядов можно нагревать кристалл или освещать длинными лучами. При этом для положительных ионов облегчается возможность обогащения электронами, тем или иным путем сорванными с катода. Перемещение этих чужеродных электронов с катода—от иона к иону—во внутрь кристалла составляет содержание того, что называется „положительным“ током. Наконец, вторичный ток, быстро растущий с усилением поля, в реферируемой статье Гудден рассматривает, как электронную лавину — нечто похожее на разряд в газе. Каждый электрон, сталкиваясь с ионом решетки, высвобождает новый электрон. Таким обрязом электронный поток быстро нарастает по мере приближения к аноду.

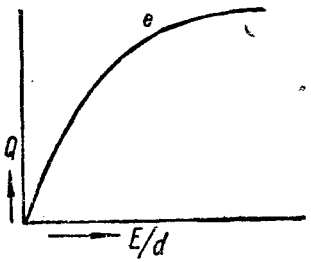

Рис. 1.

Остановимся подробнее на „отрицательном“ первичном токе. Зависимость от напряжения поля показана на рис. 1 (случай полного освещения всего кристалла). Начальный участок кривой оправдывает закон Ома. Наступление насыщения при заданной силе света определяется длиной кристалла. Как известно, именно из тока насыщения, пересчитанного на число поглощенных квант, удалось установить элементарный характер процесса: каждый квант приводит к образованию одного электрона (Поль и Гудден, 1923).

Движение электронов здесь не носит характера хаоти-

ческого движения газовых частиц, как в металлах. Напротив того, каждый сорванный электрон переносится в направлении поля на некоторый отрезок W (Wegstrecke или Schubweg у Гуддена), после чего он вновь застревает в решетке. Существует некоторая вероятность „застревания" (Wiederanlagerungwahrscheinlichkeit), зависящая от напряжения поля, от температуры и структуры решетки, но независящая от длины волны освещающего света. Таким образом следующие по направлению к аноду слои кристалла абсорбируют электроны, высвобожденные светом в предыдущих слоях. Причем коэфициент абсорбции $\alpha = \frac{1}{W}$, где W — средний „сдвиг" электрона (mittlerer „Schubweg"), есть величина, которая заменяет здесь понятие о средней длине свободного пробега. Средний „сдвиг" не имеет ничего общего со средней длиной свободного пробега. Действительно, средняя длина свободного пробега, т. е. то среднее расстояние, пройдя которое электрон отдает решетке энергию, накопленную им в электрическом поле, не должна зависеть от напряжения поля, в то время как средний „сдвиг" при не очень сильных полях и не очень малых кристаллах пропорционален полю (прямолинейный участок кривой на рис. 1). Насыщение наступает тогда, когда средний „сдвиг" становится сравним с длиной кристалла; при этом все (или почти все) сорванные электроны достигают анода.

Эта точка зрения хорошо объясняет те зависимости, которые получаются при освещении кристалла не целиком, а лишь узкой полоской света („световой зонд"), которую можно перемещать по длине кристалла. Гудден приводит кривые зависимости тока от положения светового зонда на кристалле. Величина тока насыщения, согласно нашему механизму, должна возрастать по мере удаления полосы освещения от анода. Это и наблюдается в действительности.

Механизм проводимости теснейшим образом связан с механизмом образования электронов. В каком именно месте кристалла, каким образом и при каких условиях взаимодействие светового кванта с решеткой приводит к высвобождению электрона?

Само собой разумеется, фотопроводимость всегда определяется поглощением света, однако, не всякое поглощение сопровождается фототоком. Как известно, максимумы фототока вызываются теми частями, которые наилучшим образом поглощаются данным диэлектриком. Но не наоборот: некоторые полосы поглощения никак не отражаются на кривой фототока.

Причины отсутствия фотопроводимости в этих случаях могут быть двоякового происхождения: 1) чисто электрического — когда, попросту, слишком мала средняя величина „сдвига" (Schubweg) или 2) оптического, когда энергия поглощаемого кванта тратится, например, на разрушение молекулы (фотохимический эффект) или переходит в тепловую энергию решетки, — процессы, не сопровождающиеся выделением свободного электрона.

Обычно все фотопроводящие диэлектрики делят на две группы: а) диэлектрики, обладающие непосредственной фотопроводимостью, т. е. такие, освещение которых непосредственно сопровождается появлением фототока, и б) такие, которые, прежде чем реагировать на освещение повышением своей электропроводности, требуют увеличения чувствительности. Чувствительность же к определенным длинам волн может быть увеличина опять же предварительным освещением диэлектрика светом иной характерной длины волны. (Так, например, NaCl как известно, становится чувствительной к видимому свету лишь после предварительного освещения рентгеновыми лучами).

Эти две группы диэлектриков, однако, ничем принципиально не отличаются друг от друга, как можно было бы думать на первый взгляд. Механизм образования электронов, согласно Гуддену, в обоих случаях одинаков. Здесь, однако, следует строго разграничивать два последовательных момента в процессе высвобождения электрона:

1. Прежде всего под влиянием света происходит фотохимический процесс (при освещении NaCl рентгеновыми лучами — выделение металлического Na). Для него характерна своя собственная область частот (собственное поглощение решетки). В результате в диэлектрике обра-

зуется нечто вроде „скрытого изображения“ (latentes Bild). 2. „Скрытое изображение“ образует собой те центры, в которых уже может произойти выделение свободных электронов. Поглощение света этими центрами — а для них характерен уже новый интервал частот — приводит уже непосредственно к внутреннему фотоэффекту.

В зависимости от того, насколько совпадает область собственного поглощения решетки с областью поглощения „скрытого изображения“, мы будем иметь, как два крайних случая, диэлектрики первой или второй группы. Первой — когда обе области совпадают; второй — когда, наоборот, они лежат в различных частях спектра.

Такова в основном та схема, в которую мы хотим уложить явления фотопроводимости. Ее нельзя пока считать ни законченной, ни исчерпывающей. Это не столько теория явления, сколько то направление, в котором предстоит развиваться теории.

Ф. Волькенштейн,
Москва