

Тема урока: «Внешний фотоэффект» (11 класс)

Оборудование: электромметр, эбонитовая и стеклянная палочки, мех, цинковая и медная пластинки, диск «Открытая физика»

Цель урока: обеспечение усвоения обучающимися понятия фотоэлектрический эффект и его законов.

Задачи: Образовательные задачи:

- сформировать понятие о фотоэффекте.
- объяснить законы фотоэффекта на основе квантовой теории.
- научить определять красную границу фотоэффекта.
- ознакомить учащихся с практическим применением фотоэффекта.

Развивающие:

- продолжить развитие познавательного интереса учащихся к предмету, используя демонстрационный эксперимент;
- высказывая свое мнение и обсуждая данную проблему развивать у учащихся умение говорить, спорить, доказывать, анализировать, делать выводы;
- работая с опорным конспектом, развивать умения сравнивать и критически оценивать содержание информации.

Воспитывающие:

- в ходе проведения урока воспитывать у школьников уверенность в познаваемости окружающего мира;
- способствовать воспитанию в учащихся таких качеств как самостоятельность, терпение, взаимоуважение;
- воспитывать коммуникативную культуру школьников при обсуждении проблемы в группах.

Планируемый результат УУД

- Личностные. Формируются ответственное отношение к учению, готовность и способность к саморазвитию и самообразованию на основе мотивации к обучению и познанию; коммуникативная компетентность в общении и сотрудничестве со сверстниками в процессе образовательной деятельности.
- Познавательные. Выделяют и формулируют познавательную цель. Строят логические цепи рассуждений. Производят анализ и преобразование информации.
- Регулятивные. Учатся определять цель своей деятельности, на основе соотнесения того, что уже усвоено, и того, что еще неизвестно, самостоятельно двигаться по заданному плану, оценивать и корректировать полученный результат.
- Коммуникативные. Формируются речевые умения: учатся высказывать суждения с использованием физических терминов и понятий, формулировать вопросы и ответы в ходе выполнения задания, обмениваться знаниями между членами группы для принятия эффективных совместных решений.

Содержание:

1. **Теоретический материал для самостоятельного изучения. История открытия фотоэффекта.** В конце XIX - начале XX вв. учеными открыты атомы, ядра атомов, электроны и некоторые другие микрочастицы. Эти физические объекты имеют размеры 10^{-10} - 10^{-15} и меньше. Мир малых частиц называют микромиром. Проникнув в микромир, люди узнали много нового. Известные тогда законы механики и

электродинамики не объясняли некоторые открытые явления микромира. Так, опираясь на эти законы, нельзя объяснить, почему атом, состоящий из ядра и электронов, устойчив, почему атомы излучают свет определенной частоты, почему нагретое тело, непрерывно теряя энергию вследствие излучения электромагнитных волн не охлаждается до абсолютного нуля. Накопился ряд опытных фактов, которые не смогла объяснить физическая теория того времени – электромагнитная теория Максвелла. Противоречия между опытом и практикой были разрешены немецким физиком Максом Планком: атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями – квантами. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения света: $E = h\nu$. Коэффициент пропорциональности получил название постоянной Планка, и она равна: $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. После открытия Планка начала развиваться самая современная и глубокая физическая теория – квантовая физика. Как объяснить новые экспериментальные факты, каким новым законам подчинено движение микрочастиц? В спорах ученых и борьбе научных мнений возникли и получили развитие новые физические идеи: о дискретных уровнях энергии атомов, о волновом характере движения частиц, о квантовой природе света. Они легли в основу новой области физики.

Квантовая физика – это раздел современной физики, в котором изучаются свойства строения атомов и молекул, движение и взаимодействие микрочастиц. В возникновении квантовой физики важнейшую роль сыграло изучение взаимодействия электромагнитных волн с веществом.

В 1886 г. немецкий физик Г. Герц, конструируя приемник электромагнитных волн (диполь Герца), всячески воздействовал на шарики и промежуток между ними, чтобы облегчить прием сигнала. Среди многих воздействий он пробовал освещать шарики излучением. Он установил, что при освещении ультрафиолетовыми лучами отрицательно заряженного проводника, прием устойчивее. Таким образом, было открыто явление электризации металлических поверхностей при их освещении. Позднее ученые выяснили, что под действием света часть электронов, входящих в состав тела, покидают его. Явление вырывания электронов из металла под действием света называется фотоэффектом.

2. Поиск закономерностей нового явления. Исследования А.Г. Столетова.

Для начала рассмотрим серию опытов.

Демонстрация №1. Сообщим отрицательный заряд электрометру Э, соединенному с цинковой пластиной П. Этот заряд сохраняется остаточное время. Если осветить дуговым фонарем Д, то электрометр начинает разряжаться.

Демонстрация №2. Перекроем поток лучей стеклом разряд электрометра сразу прекращается.

Демонстрация №3. Теперь сообщим положительный заряд, то при таком же освещении разряд электрометра не наблюдается.

Демонстрация №4. Если увеличить интенсивность потока падающего света (придвинуть ближе фонарь), то скорость стекания заряда увеличится, т.е. электрометр разряжается быстрее.

Если же заменить цинковую пластинку на медную, то, повторив опыты при тех же условиях, результаты будут другими.

По результатам опыта можно сделать выводы:

1. Под действием света разряжаются только отрицательно заряженные металлы. Разряд металлов означает, что из него вырываются электроны. Следовательно, при некоторых условиях свет способен вырывать электроны из металла.

2. Разряд начинается одновременно с началом освещения, следовательно, фотоэффект безынерционен.

3. Наличие фотоэффекта зависит от рода освещаемого металла и от спектрального состава излучения. Скорость разряда зависит также и от падающей за единицу времени световой энергии.

После открытия Герцем явления фотоэффекта, его исследованиями занялся русский физик А.Г.Столетов (1839 – 1896).

Изучение закономерностей фотоэффекта на установке, подобной установке Столетова (диск «Открытая физика 2.1»)

Демонстрация №5. В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещают два электрода. Внутри баллона на один из электродов поступает свет через окошко. На электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром. К освещаемому электроду присоединяют отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток.

Демонстрация №6. Если с помощью потенциометра увеличить напряжение на электродах (интенсивность света не меняется), то по показаниям гальванометра видно, что сила тока увеличивается.

Демонстрация №7. При некотором значении напряжения сила тока достигает максимального значения и при дальнейшем увеличении напряжения сила тока не меняется. Максимальное значение силы тока $I_{\text{нас}}$ называется током насыщения. Ток насыщения определяется числом электронов, испущенных за 1с освещаемым электродом. Если уменьшится интенсивность падающего света, то сила тока насыщения уменьшится.

Первый закон фотоэффекта: фототок насыщения - максимальное число фотоэлектронов, вырываемых из вещества за единицу времени, - прямо пропорционален интенсивности падающего излучения.

Рисунок 1

Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности излучения, падающего на металл. Это можно объяснить тем, что число фотоэлектронов, вырываемых с катода за единицу времени прямо пропорционально интенсивности света.

$I_{\text{нас}} \sim \Phi$.

2. Если перед падающим белым светом поставить фиолетовый светофильтр, то фотоэффект для данного металла наблюдается. Если же поставить красный светофильтр, то фотоэффект не наблюдается.

Демонстрация №8. Независимо от интенсивности излучения фотоэффект начинается только при некоторой частоте падающего света. Эта частота будет различной для различных металлов. При меньших частотах фотоэффект для металла наблюдаться не будет. Поэтому наименьшую частоту, при которой начинается фотоэффект или соответствующую ей длину волны называют красной границей фотоэффекта.

Демонстрация №9. Второй закон фотоэффекта: Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности света. Она линейно возрастает с увеличением частоты падающего света.

3. Объяснение законов фотоэффекта на основе волновой теории света. Недостатки волновой теории света.

Согласно волновой теории света, свет несет электромагнитную энергию, которую при освещении металла передает электронам. Скорости электронов в металле различны. Среди

них электроны с такими скоростями, для которых полученной от света энергии достаточно для того, чтобы покинуть металл. Таким образом, волновая электромагнитная природа света позволяет объяснить само явление фотоэффекта.

Металлы представляют собой потенциальную яму для электрона, т.е. удерживают электрон. Различные металлы притягивают вылетевший из них электрон с разной силой. Поэтому скорость вылетевших фотоэлектронов зависит от рода металла.

Чем больше интенсивность светового потока, тем большее число электронов в металле могут увеличить свою энергию и вырваться за пределы металла. Это демонстрирует зависимость фототока насыщения в вакуумном фотоэлементе от интенсивности падающего света.

Согласно электромагнитной природе света, интенсивность светового потока должна определять кинетическую энергию электронов. Однако оказалось, что кинетическая энергия электронов, вылетевших из металла под действием света, не зависит от интенсивности падающего света, а зависит от его частоты. А само явление фотоэффекта наблюдается не при любых частотах, а начиная с некоторой минимальной частоты, характерной для каждого металла. Объяснение того, почему существует порог фотоэффекта (красная граница), почему максимальная начальная скорость (или максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов) не зависит от интенсивности света, а определяется только его частотой (линейно возрастает с частотой), а также объяснение безынерционности фотоэффекта не может быть дано на основе волновой электромагнитной теории света. Ведь по этой теории вырывание электронов является результатом их “раскачивания” в переменном электрическом поле световой волны. Но тогда и скорость, и кинетическая энергия фотоэлектронов должны зависеть от амплитуды вектора напряженности электрического поля волны и, следовательно, от интенсивности, “раскачку” электрона требуется время, эффект не может быть безынерционным.

Несоответствие экспериментальных фактов сложившейся волновой теории света доказывало ее несостоятельность при объяснении взаимодействия света с веществом и требовало создания новой физической теории, позволяющей по-другому посмотреть на природу света.

➤ **Законы фотоэффекта.**

Фотоэффект был не первым явлением, в котором невозможно применить электромагнитные представления о свете. Впервые недостатки этих представлений были обнаружены при изучении закономерностей теплового излучения.

Для объяснения теплового излучения в 1900 г. М.Планк вынужден был высказать, на первый взгляд нелепую идею, что тело излучает энергию не непрерывно, а отдельными порциями (квантами). Эта идея противоречила сложившимся представлениям классической физики, где процессы и величины, характеризующие свет изменяются непрерывно.

В 1905г. А. Эйнштейн эту идею развил для объяснения фотоэффекта. Он к гипотезе Планка добавил постулат о том, что свет не только испускается, но и поглощается квантами с энергией: $E=h\nu$, где h - постоянная Планка, ν -частота падающего на металл света.

Энергия фотона пропорциональна частоте света. Чем больше частота излучения, тем большую энергию несет каждый его фотон. Энергия фотонов длинноволнового излучения меньше.

Далее Эйнштейн для описания взаимодействия кванта света с электроном использовал закон сохранения энергии: энергия кванта света идет на совершение работы по вырыванию электрона из металла и на сообщение электрону кинетической энергии:

$h\nu = A_{\text{в}} + E_{\text{к}}$ - уравнение фотоэффекта - уравнение Эйнштейна, где $h\nu$ – энергия фотона; $A_{\text{в}}$ – работа выхода из металла; $E_{\text{к}}$ -максимальная кинетическая энергия электрона.

В этой формуле идет речь о максимальной кинетической энергии электрона, так как Эйнштейн предположил, что каждый фотон взаимодействует не со всем веществом, на которое падает свет и даже не с атомом в целом, а с отдельным электроном атома. Фотон отдает свою энергию электрону, а электрон, получив энергию, вырывается из металла с определенной кинетической энергией (демонстрация №10).

Демонстрация №10

➤ Квантовая теория фотоэффекта.

Сила фототока насыщения определяется числом электронов, вылетающих за единицу времени с освещаемой поверхности, а интенсивность света – числом ежесекундно падающих фотонов. Так как каждый фотон может выбить с поверхности металла лишь один электрон, то, естественно, что сила фототока насыщения (число вырванных электронов) будет пропорционально интенсивности света (числу падающих фотонов).

Важно заметить, что наблюдают прямую пропорциональность, а не равенство, так как часть падающих на металл фотонов отражается, а из поглощенных фотонов не все вырывают из металла свободные электроны. Энергия части поглощенных фотонов превращается во внутреннюю энергию металла.

Второй закон фотоэффекта. Далее объясняют, почему наибольшая кинетическая энергия фотоэлектронов зависит от частоты падающего света, а не от его интенсивности. Из уравнения Эйнштейна

$E_{\text{к}} = h\nu - A_{\text{в}}$ следует: так как для вещества работа выхода постоянна ($A_{\text{в}} = \text{const}$), то наибольшая кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте падающего света.

Третий закон фотоэффекта: для каждого вещества существует граничная частота такая, что излучение меньшей частоты не вызывает фотоэффекта, какой бы ни была интенсивность падающего излучения. Эта минимальная частота излучения называется **красной границей** фотоэффекта. Анализируя случай, когда энергия светового кванта численно равна работе выхода $A_{\text{в}}$:

$h\nu_{\text{min}} = A_{\text{в}}$, или $\nu_{\text{min}} = A_{\text{в}} / h$

Следовательно, вся энергия фотона идет на совершение работы выхода и скорость электронов равна нулю. Минимальная (граничная) частота фотоэффекта $\nu_{\text{min}} = A_{\text{в}} / h$. При условии $\nu < \nu_{\text{min}}$ фотоэффекта нет. Это длинноволновая граница фотоэффекта. Она зависит только от работы выхода, т.е. от химической природы металла, и может лежать на любом участке оптического диапазона. Для каждого вещества есть своя красная граница фотоэффекта.

Таким образом, уравнение фотоэффекта объясняет все законы внешнего фотоэффекта.

Известно, что фототоком можно управлять, подавая на металлические пластины различные напряжения. Если на систему подать небольшое напряжение обратной полярности, "затрудняющее" вылет электронов, то ток уменьшится, так как фотоэлектронам, кроме работы выхода, придется совершать дополнительную работу против сил электрического поля.

Задерживающее напряжение - минимальное обратное напряжение между анодом и катодом, при котором фототок равен нулю.

Максимальная кинетическая энергия электронов выражается через задерживающее напряжение:

$$E_k^{max} = \frac{m_e v_m^2}{2}$$

$$E_k^{max} = eU_3$$

где E_k^{max} - максимальная кинетическая энергия электронов;

e – заряд электрона;

U_3 – задерживающее напряжение.

Если фотоэффект сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внешним фотоэффектом** или *фотоэлектронной эмиссией*, а вылетающие электроны - *фотоэлектронами*. Если фотоэффект не сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внутренним**.

- **Применение фотоэффекта.** Фотоэффект широко используется в науке и технике для регистрации и измерения световых потоков, для непосредственного преобразования и измерения света в энергию электрического тока, для преобразования световых сигналов в электрические сигналы. Приборы, действие которых основано на явлении фотоэлектрического эффекта, называются фотоэлементами. Простейший, вакуумный, фотоэлемент представляет собой эвакуированный стеклянный баллон, часть внутренней поверхности которого покрыта слоем металла, играющим роль фотокатода. При освещении катода из него, вследствие внутреннего фотоэффекта (под действием света, падающего на полупроводник и диэлектрик, из их атомов освобождаются и становятся свободными электроны-электроны проводимости), выбиваются электроны, и в цепи возникает фотоэлектрический ток. Величина напряжения батареи выбирается такой, чтобы фототок был равнее току насыщения. В зависимости от спектрального состава света используются фотоэлементы, катоды которых изготовлены из различных материалов.

Полупроводниковые фотоэлементы с внутренним фотоэффектом, или фотосопротивления, обладают значительно большей чувствительностью, чем описанные выше фотоэлементы, в которых используется внешний фотоэффект.

Фотосопротивления широко применяются для обнаружения и измерения инфракрасного и других излучений.

Фотоэлементы применяются в автоматике (автоматическое открывание дверей при подходе человека или ворот гаража въезжающему в него автомобилю, при автоматическом включении и выключении городской осветительной сети), для подачи сигналов точного времени, в химическом производстве для проверки прозрачности жидкости, в телевидении и звуковом кино.

Решение задач:

1. На металлическую пластинку с работой выхода $A=2$ эВ падает излучение, имеющее три частоты различной интенсивности. Определите кинетическую энергию фотоэлектронов в каждом случае.
2. Фотокатод облучают светом с длиной волны $\lambda=300$ нм. Красная граница фотоэффекта для вещества катода $\lambda_{max}=450$ нм. Какое напряжение U нужно создать между анодом и катодом, чтобы фототок прекратился?

3. Красная граница фотоэффекта для вещества фотокатода $\lambda_{\max}=450$ нм. При облучении катода светом с длиной волны λ фототок прекращается, когда напряжение между анодом и катодом $U=1,4$ В. Определите длину волны падающего света λ .
4. При облучении катода светом с длиной волны $\lambda_{\max}=300$ нм фототок прекращается, когда напряжение между анодом и катодом $U=1,4$ В. Определите красную границу фотоэффекта λ_{\max} для вещества фотокатода ()
5. Фотокатод, покрытый кальцием (работа выхода $A=4,42 \cdot 10^{-19}$ Дж), освещается светом с длиной волны $\lambda=300$ нм. Вылетевшие из катода электроны попадают в однородное магнитное поле с индукцией $B=8,3 \cdot 10^{-4}$ Тл перпендикулярно линиям индукции этого поля. Рассчитайте максимальный радиус окружности R , по которой движутся электроны ($R=4,7 \cdot 10^{-3}$ м)
6. В вакууме находятся два покрытых кальцием электрода, к которым подключен конденсатор емкостью $C=8000$ пФ. При длительном освещении катода светом фототок, возникший вначале, прекращается, а на конденсаторе появляется заряд $q=11 \cdot 10^{-9}$ Кл. Работа выхода электронов из кальция $A=4,42 \cdot 10^{-19}$ Дж. Определите длину волны λ света, освещающего катод ($\lambda=300$ нм)