

В.Н. Кухарев

## Фотоинжекционная эмиссия и особенности плазменно-аэрозольных образований

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 18.08.2006 г.

Приведены описание и элементарная теория нового вида эмиссии заряженных частиц из объемно-заряженных эмиттеров под действием света. Такой вид эмиссии назван «фотоинжекционной эмиссией», главное свойство которой – изменение граничной частоты фотоэффекта для эмиттеров из одного и того же материала в зависимости от величины избыточной объемной концентрации заряженных частиц в приповерхностном объеме эмиттера. Выделен класс процессов (инжекционная, фотоинжекционная эмиссия заряженных частиц и нейтралов), обусловленных объемно-заряженным состоянием конденсированного вещества. Предполагается, что цветовые оттенки мезосферных облаков образуются при участии процессов фотоинжекционной эмиссии с объемно-заряженных аэрозолей, заряжаемых на больших высотах высокоэнергетичным корпускулярным и электромагнитным космическими излучениями.

Основное уравнение фотоэффекта устанавливает связь между энергией кванта, вызывающего фотоэффект, работой выхода электронов из металла и максимальной кинетической энергией вылетающего электрона. Уравнение имеет вид

$$h\nu = E_e + (m_e V^2)/2, \quad (1)$$

где  $m_e$  – масса электрона;  $V$  – максимальная скорость электрона;  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота световой волны.

В данной статье рассматривается случай, когда в объеме одного и того же эмиттера создаются условия, приводящие к изменению положения максимальной длины волны в спектре поглощения света эмиттером, выше которой эмиссия электронов прекращается (длина волны красной границы). Задача изменения положения красной границы для одного и того же материала является интересной как в научной, так и в прикладной области.

В работе [1] показано, что появление избыточной концентрации электронов ( $\Delta n_e$ ) в поверхностном слое эмиттера приводит к уменьшению работы выхода электронов ( $E_e$ ) из эмиттера на величину возрастания энергии уровня Ферми ( $\Delta E_f$ ) согласно выражению

$$\Delta E_f = E_{e0} - E_e = E_f(n_{0e} + \Delta n_e) - E_f(n_{0e}), \quad (2)$$

где  $E_{e0}$  – работа выхода при  $\Delta n_e = 0$ ,  $E_e$  – при  $\Delta n_e \neq 0$ ;  $n_{0e}$  – равновесная концентрация электронов в эмиттере;  $E_f(n_{0e} + \Delta n_e)$  – энергия уровня Ферми при неравновесной концентрации электронов ( $n_{0e} + \Delta n_e$ );  $E_f(n_{0e})$  – энергия Ферми при равновесной концентрации электронов ( $n_{0e}$ ).

Из (2) можно найти работу выхода  $E_e$  электронов при неравновесной концентрации  $\Delta n_e \neq 0$ :

$$E_e = E_{e0} - [E_f(n_{0e} + \Delta n_e) - E_f(n_{0e})]. \quad (3)$$

Из (1) и (3) имеем

$$E_e = E_{e0} - [E_f(n_{0e} + \Delta n_e) - E_f(n_{0e})] = h\nu - (m_e V^2)/2. \quad (4)$$

Из (4) следует, что для неравновесных концентраций электронов в эмиттере работа выхода  $E_e$  может принимать положительное, нулевое, отрицательное значения.

При положительном значении проявляется свойство внешнего фотоэффекта, отраженное в формуле (1). При минимальной частоте  $\nu_{\min}$  света, когда кинетическая энергия эмитированных фотоэлектронов равна нулю, имеем

$$h\nu_{\min} = E_e. \quad (5)$$

Из (2), (3) и (5) находим

$$\nu_{\min} = E_e/h = (E_{e0} - \Delta E_f)/h = C/\lambda_{\max}, \quad (6)$$

где  $C$  – скорость света;  $\lambda_{\max}$  – граничная длина волны света для данной неравновесной концентрации электронов  $n_e$  в эмиттере. При длине волны светового излучения больше  $\lambda_{\max}$  выход фотоэлектронов прекращается. Длину волны  $\lambda_{\max}$  можно назвать красной границей фотоэффекта при неравновесной концентрации электронов в приповерхностном объеме эмиттера.

Когда работа выхода принимает нулевые или отрицательные значения [из соотношения (3)], эмиссия электронов может осуществляться как при любой частоте света, так и без воздействия света. В этом случае проявляется эффект инжекционной эмиссии [1] заряженных частиц из эмиттера, когда энергия отталкивания между частицами избыточной концентрации в приповерхностном объеме превышает работу выхода  $E_{e0}$  при  $\Delta n_e = 0$ . Отметим, что инжекционная эмиссия может быть реализована

как для электронов, так и для положительных ионов ионного каркаса эмиттера в случае, когда энергия отталкивания соответствующих заряженных частиц становится выше работы их выхода при  $\Delta n_e = 0$  и выше энергии поверхностного натяжения (свободной энергии) материала эмиттера, находящегося в конденсированном агрегатном состоянии.

Эффект выброса положительных ионов с электродов наблюдался в тех случаях, когда объемный избыточный заряд приобретался приповерхностным слоем эмитирующих электродов за счет импульсов высокого напряжения, прикладываемых к ним с высокой скоростью нарастания  $\sim 10^{14}$  В/с при амплитуде потенциала  $\sim 10^5$  В [1–3].

При использовании диэлектриков и полупроводников в качестве эмиттеров избыточный объемный заряд в поверхностном слое, наряду с эффектом фотоинжекционной эмиссии (см. выше), способен вызвать проявление внутреннего фотоэффекта, т.е. когда поле избыточного объемного заряда переводит электроны из валентной зоны в зону проводимости или на уровень в запрещенной зоне, но близкий к верхнему уровню валентной зоны или к нижнему уровню зоны проводимости.

Из вышеизложенного следует, что наличие неравновесной объемной концентрации элементарных зарядов в различных материалах в конденсированном состоянии может привести к тому, что металлы будут проявлять себя как полупроводники или как изоляторы при меньшем или большем недостатке отрицательного объемного заряда в объеме металла соответственно. При этом изоляторы и полупроводники могут проявлять себя соответственно как полупроводники или проводники при соответственно меньшем или большем избытке отрицательного объемного заряда в объеме изоляторов и полупроводников.

Состояния, при которых проявляются выше рассмотренные свойства тел в конденсированном агрегатном состоянии при неравновесной объемной концентрации зарядов, можно назвать «объемно-заряженными состояниями» (ОЗС). Аэрозольные частицы [4,5] с неравновесным объемным зарядом могут рассматриваться в качестве объектов ОЗС.

Свойства ОЗС при лазерном зондировании атмосферных аэрозолей (в первую очередь металлодержащих) можно учитывать и использовать для определения параметров аэрозольных частиц, например уровня их электризации,  $\Delta n_e$  (избыточная объемная концентрация электронов в материале аэрозоля), показателя преломления, электропроводности и др.).

Действительно, фотоинжекционная эмиссия, так же как и обычная фотоэмиссия, есть процесс поглощения веществом фотонов, энергия которых превышает работу выхода заряженных частиц (в нашем случае — электронов). Поэтому в спектре отраженного света при переходе к длинам волн падающего света меньше  $\lambda_{\max}$  должен наблюдаться резкий спад интенсивности отраженного света. По расположению этого спада можно определить  $\lambda_{\max}$  и работу выхода электронов.

Из физики твердого тела [6] известна зависимость энергии уровня Ферми  $E_f(n_e)$  от концентрации электронов  $n_e$  в веществе:

$$E_f(n_{0e}) = (3n_e/8\pi)^{2/3} (h^2/2m_e^*), \quad (7)$$

где  $m_e^*$  — эффективная масса электронов.

Приняв  $n_e = n_{0e} + \Delta n_e$  и используя соотношения (1)–(7), получим

$$E_f(n_{0e} + \Delta n_e) = E_{e0} - E_e + E_f(n_{0e}). \quad (8)$$

Если известен материал аэрозолей, то известны значения (как справочные)  $E_{e0}$ ,  $E_f(n_{0e})$ ,  $n_{0e}$ .

Определив  $\lambda_{\max}$  или  $\nu_{\min}$  по спектру отраженного света, найдем из (5) работу выхода  $E_e$  электронов для их неравновесной концентрации ( $n_{0e} + \Delta n_e$ ), равную  $h\nu_{\min}$ .

Из (8) получим значение  $E_f(n_{0e} + \Delta n_e)$  для неравновесной концентрации электронов:

$$E_f(n_{0e} + \Delta n_e) = E_{e0} - h\nu_{\min} + E_f(n_{0e}). \quad (9)$$

Подставляя его в (7), находим значение неравновесной концентрации электронов в материале объемно-заряженных аэрозолей:

$$n_{0e} + \Delta n_e = 8\pi/3 \{ [E_{e0} - h\nu_{\min} + E_f(n_{0e})] 2m_e^*/h^2 \}^{3/2}. \quad (10)$$

В правой части выражения (10) все члены, кроме  $h\nu_{\min}$ , являются справочными для данного материала аэрозоля. Благодаря этому можно легко находить уровень их электризации (избыточной объемной концентрации электронов  $\Delta n_e$ ) и определять как электрофизические, так и оптические характеристики аэрозольных образований при их лазерном зондировании, используя функциональную связь показателя преломления и проводимости аэрозолей с величинами ( $n_{0e} + \Delta n_e$ ) и  $\Delta n_e$ .

Можно предположить, что аэрозольные облака проявляют свои свойства при участии фотоинжекционной эмиссии с аэрозолей, объемно-заряженных высокоэнергетичным корпускулярным и электромагнитным космическим излучением на больших высотах. Различные цветовые оттенки облаков могут быть обусловлены отражением солнечного света от аэрозольных облаков в основном в области спектра с длинами волн, превышающими  $\lambda_{\max}$ . Более коротковолновое излучение должно интенсивно поглощаться из-за потерь энергии фотонов на фотоинжекционную эмиссию электронов с объемно-заряженных аэрозолей наряду с потерями в ионосфере.

Следует отметить, что наиболее достоверную информацию об уровне электризации аэрозолей можно, по-видимому, получить при импульсно-периодическом лазерном зондировании с периодом, достаточным для установления стационарного уровня электризации после воздействия лазерного излучения. При зондировании с постоянной мощностью лазерного излучения ток фотоинжекционной эмиссии с аэрозолей не должен превышать тока

объемной зарядки аэрозолей в электризационном процессе (электризации).

Из вышесказанного следует, что свойства объемно-заряженных состояний могут быть использованы для управления электрофизическими и оптическими параметрами различных материалов, такими как коэффициент отражения, экстинкции, показатель преломления, коэффициент диэлектрической проницаемости, проводимость, работа выхода, а также в области высоковольтной, импульсной, ускорительной техники и при разработке фотоэлектронных приборов с перестраиваемым диапазоном рабочих длин волн.

В заключение автор благодарит д.ф.-м.н. В.М. Климкина за полезные критические замечания, полученные при подготовке статьи.

1. *Кухарев В.Н.* Инжекционная эмиссия с объемно-заряженных электродов // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19. № 2–3. С. 258–262.
2. *Миссол В.* Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. М.: Металлургия, 1978. 176 с.
3. *Сильные электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология):* Сб. статей. Вып. 3 / Под ред. академика В.И. Попкова. М.: Энергия, 1979. 185 с.
4. *Цытович В.Н.* Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // *Успехи физ. наук.* 1997. Т. 167. № 1. С. 57–100.
5. *Кухарев В.Н., Рахимов Р.Ф.* Плазменно-пылевые явления в активном объеме лазеров на парах меди // 4-й Симпозиум «Оптика атмосферы и океана». Томск: ИОА СО РАН, 1997. С. 2008–2009.
6. *Кристи Р., Питти А.* Строение вещества: введение в современную физику. М.: Наука, 1969. 596 с.

*V.N. Kukharev. Photoinjection emission and characteristics of plasma-aerosol formations.*

The description and the elementary theory are presented of a new type of emission of charged particles from the volume-charged emitters under the action of light. Such type of emission is known as a «photoinjection emission», which basic characteristic is the variation of the photoeffect threshold frequency for emitters made of the same material depending on the excess volume concentration of charged particles in the surface volume of the emitter. The condensed substances under the action of a volume excess charge relate to the class of volume-charged states (VCS). It is assumed that so-called noctilucent clouds are formed with participation of the photoinjection emission from the volume-charged aerosols charged by high-energy corpuscular and electromagnetic cosmic radiation at high altitudes.