

04;06;07

Наблюдение фотоЭДС при резонансном лазерном возбуждении паров натрия

© Н.А. Горбунов, Т. Stacewicz

Научно-исследовательский институт физики
С.-Петербургского государственного университета
Institute of Experimental Physics, Warsaw University,
Hoza 69, 00-689 Warsaw, Poland

Поступило в Редакцию 16 марта 2000 г.

Предложен способ прямого преобразования световой энергии в электрическую в фотоплазме. Экспериментально наблюдалась фотоЭДС при импульсном лазерном возбуждении паров натрия. Показано, что причиной возникновения разделения электрических заряженных частиц в плазме является неоднородное распределение резонансно возбужденных атомов вдоль направления оси оптического возбуждения.

Изменение проводимости при поглощении света в полупроводниках [1] и в плазме электрического разряда (оптогальванический эффект) [2] применяется при регистрации оптического излучения. В полупроводниках также всесторонне исследован эффект возникновения фотоэлектродвижущих сил, который нашел широкое практическое применение в устройствах прямого преобразования световой энергии в электрическую. В отличие от полупроводников в плазме менее исследовано явление возникновения фотоЭДС.

Возникновение разности потенциалов между отдельными точками газовой среды при ее облучении светом можно условно разделить на два этапа: образование заряженных частиц (фотоионизация) и разделение зарядов в пространстве.

Образование плазмы в парах металлов под действием оптического излучения достаточно широко изучено как теоретически, так и экспериментально (см. для примера [3–5]). Наибольшая степень ионизации среды достигается при совпадении величины кванта внешнего излучения с энергией резонансного перехода атома. Это связано с эффективным поглощением резонансных квантов излучения в газах, с их последующим преобразованием в энергию ионизации преимущественно

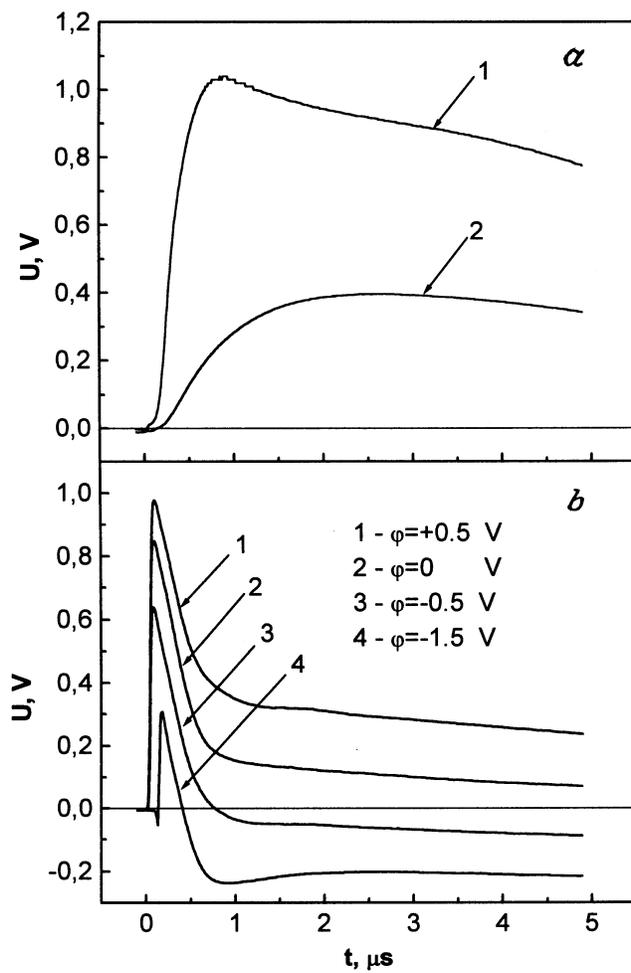
за счет процессов с участием электронов, нагретых при сверхупругих столкновениях с оптически возбужденными атомами.

Механизм образования фотоиндуцированной разности потенциалов исследовался в связи с задачей прямого преобразования световой энергии в электрическую в фотоплазме. Так, в работе [6] предлагалось осуществить конверсию солнечного излучения в фотоплазме на основе МГД преобразования. В работах [7,8] экспериментально исследовалось преобразование лазерного излучения в электричество в термо-эмиссионном преобразователе, плазма в котором инициировалась при помощи CO_2 -лазера. Менее изучен механизм разделения зарядов при резонансном оптическом возбуждении. В работе [9] экспериментально наблюдалась ЭДС в СВЧ разряде в криптона при облучении кюветы перпендикулярно к ее оси лазерным излучением в области перехода $1s3-2p3$ 785.5 nm. Механизм возникновения фотоЭДС (порядка 0.1 V при мощности лазерного излучения ~ 1 mW) связан с нарушением симметрии в разряде, вызванной изменением плотности метастабильных состояний Kr ($1s3$) под действием резонансного лазерного излучения.

В данной работе приводятся результаты экспериментального наблюдения фотоЭДС при облучении паров натрия импульсами резонансного лазерного излучения. Пары заполняли стеклянную трубку с внутренним диаметром $d = 20$ mm и длиной $L = 70$ mm, на концах которой были вварены цилиндрические коваровые электроды, предназначенные для измерения тока. На торцах электродов имелись сапфировые окошки для ввода лазерного излучения. Требуемая плотность паров натрия задавалась при помощи нагревателя.

Источником резонансного оптического возбуждения паров натрия служил импульсный перестраиваемый лазер. Спектральная полуширина излучения, соответствующая резонансным переходам Na ($3S-3P_{1/2,3/2}$), составляла ~ 0.5 Å. Энергия лазерного импульса достигала 20 mJ при длительности импульса ~ 7 ns и частоте следования 10 Hz. В эксперименте при помощи цифрового осциллографа HP54220 A измерялось падение напряжения U на измерительном резисторе $R = 50 \Omega$, включенном последовательно с газонаполненной ячейкой и источником постоянного тестирующего напряжения φ .

Зависимости U от времени при $[\text{Na}] = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и $\varphi = 0$ изображены на рисунке, а. На первой кривой приведены результаты измерений в случае совпадения центра линии поглощения $3S_{1/2}-3P_{3/2}$ с длиной волны лазерного излучения, соответствующей максимальной



Зависимость измеренного напряжения от времени: *a* — в парах натрия; *b* — в смеси Na + He.

мощности генерации лазера. Как видно из рисунка, в этих условиях возникает разность потенциалов между электродами и во внешней цепи протекает ток. Остановимся на качественной интерпретации этого

явления. В рассматриваемых условиях плотность мощности лазерного излучения недостаточна для оптического насыщения резонансного перехода однородно по всей длине кюветы. Поглощение световой энергии происходит на нескольких первых миллиметрах от входного окна. Это приводит к тому, что возникает неоднородное распределение возбужденных атомов вдоль оси кюветы и, как следствие, к неоднородному образованию плазмы. Наблюдалось, что основное свечение плазмы сосредоточено в узком слое около окна, через которое вводится лазерное излучение. Около этого окна возникает положительный потенциал, поскольку здесь образуется избыток положительных ионов, связанный с диффузионным уходом более подвижных электронов. Возникающая амбиполярная разность потенциалов $\Delta\phi \approx (T_e/e)/\ln(n_1/n_2)$ определяется температурой электронов (T_e) и плотностями заряженных частиц n_1 и n_2 на противоположных концах кюветы [10].

Величина фототока во внешней цепи зависит от соотношения величины сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника фотоЭДС. Как видно из представленных результатов, максимальное значение фототок принимает через микросекунду после окончания лазерного импульса. Это совпадает со временем достижения максимальной плотности электронов [5]. Спад фотоЭДС после одной микросекунды обусловлен релаксацией T_e и размыванием в пространстве зоны первичной ионизации за счет переноса резонансного излучения. При смещении длины волны генерации лазера на один ангстрем (крыло линии поглощения) кривая 2 (см. рисунок) происходит уменьшение значения фотоЭДС. Это связано с более однородным возбуждением паров натрия вдоль лазерного луча, что наблюдалось нами по свечению плазмы.

На рисунке, *b* приведены результаты измерения в смеси натрия $[\text{Na}] \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ и гелия $[\text{He}] = 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ при различных напряжениях источника постоянного смещения. По сравнению со случаем чистого натрия при $\varphi = 0$ наблюдается уменьшение длительности импульса фотоЭДС. Максимальное значение U наблюдается на $0.2 \mu\text{s}$ после импульса лазерного излучения. Указанное время совпадает со временем релаксации T_e при столкновениях с атомами гелия. После этого плазма переходит в режим деионизации, и рост концентрации заряженных частиц в плазме прекращается. Увеличение скоростей релаксации T_e и процессов переноса резонансного излучения, вызванное влиянием буферного газа, приводит к сокращению времени спада фотоЭДС по сравнению со случаем чистого натрия.

Наложение внешнего поля увеличивает ток в нагрузке, если дрейф электронов в этом поле совпадает с направлением амбиполярной диффузии (кривая *1*, см. рисунок, *b*). В противоположном случае (кривые *3* и *4*, см. рисунок, *b*) ток в цепи определяется разностью фотоЭДС и внешнего напряжения. Максимальное значение фотоЭДС, измеренное компенсационным методом, составляет величину $\Delta\varphi_{\max} \sim 3 \text{ V}$.

Таким образом, в данной работе экспериментально зарегистрирована фотоЭДС, образующаяся за счет неоднородного возбуждения атомов в газонаполненной ячейке. Этот эффект является аналогом ЭДС Дембера, которая возникает при неравномерном возбуждении однородного полупроводника [1]. В отличие от полупроводников возникновение фотоЭДС в плазме носит резонансный характер по отношению к длине возбуждающего излучения.

Авторы благодарны Л.Д. Цендину за обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке гранта KBN (Польша).

Список литературы

- [1] Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. 680 с.
- [2] Очкин В.Н., Преображенский Н.Г., Шапарев Н.Я. Оптогальванический эффект в ионизованном газе. М.: Наука, 1991. 159 с.
- [3] Бетеров И.М., Елецкий А.В., Смирнов Б.М. // УФН. 1988. Т. 155. № 2. С. 265–298.
- [4] Касьянов В.А., Старостин А.Н. // Химия плазмы / Под ред. Б.М. Смирнова. № 16. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 67–97.
- [5] Безуглов Н.Н., Ключарев А.Н., Стасевич Т. // Опт. и спектр. 1994. Т. 77. № 3. С. 342–368.
- [6] Dunning G.J., Palmer A.J. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. N 12. P. 7086–7091.
- [7] Thompson R.W., Manista E.J., Alger D.L. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. N 10. P. 610–611.
- [8] Britt E.J., Rasor N.S., Lee G., Billman K.W. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 5. P. 385–386.
- [9] Brandenberg J.R. // Phys. Rev. A. 1987. V. 36. N 1. P. 76–80.
- [10] Рожанский В.А., Цендин Л.Д. Столкновительный перенос в частично ионизованной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1988. 245 с.