2U54U4U1 UU2 ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒ58ՆԵՐ ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

1983

-260

LXXVI

УДК 537 533 7

ФИЗИКА

5

Ф. Р. Арутюнян, А. Х. Мхитарян, Р. А. Оганесян, Б. О. Ростомян

Интегральные по спектру характеристики оптического излучения электронов при прохождении через шероховатую границу раздела

(Представлено акдемиком АН Армянской ССР М. Л. Тер-Микаеляном 2/VI 1982)

1. Исследованию излучения в оптической области, возникающего при влете нерелятивистских электронов в вещество, в последние

20 лет посвящено много экспериментальных работ. Для тонких пленок (толщиной много меньше длины волны излучения) и углов влета электрона $4 \le 45^\circ$ (4 отсчитывается от нормали к поверхности мишени) все обстоит достаточно ясно — излучение как по абсолютной величине интенсивности, так и по различным функциональным характеристикам хорошо объясняется теорией переходного излучения (1). Для массивных мишеней с ростом угла влета электрона (в области ч≥45°) интенсивность излучения растет, причем наблюдается неполяризованная компонента излучения большой интенсивности, что не может быть объяснено переходным излучением. Впервые такое расхождение с теорией было обнаружено уже в экспериментах по исследованию переходного излучения (см. (²) и обзор (³)), а затем и в других работах (4.5) ("аномальный" пик в спектре излучения серебра на /≈350 нм). Имелись попытки объяснить последнее тормозным излучением, возбуждением поверхностных воли и т. д. (4-6). Однако интенсивное излучение было обнаружено нами и для других металлов (Al, Ge, In, Au, Pt) в широком спектральном интервале и было показано, что отмеченные выше механизмы излучения не дают ощутимого вклала в излучение (1-9), которое, на наш взгляд, определя-

ется шероховатостью поверхности мишени. Эксперименты (^{8,9}) были выполнены для полированных и шероховатых мишеней из Al, Ag и Ge. Численные значения параметров, характеризующих степень шероховатости использованных в (^{8,9}) мишеней, не были известны, поэтому результаты наших исследований носили качественный характер.

В связи с этим нами выполнена серия новых экспериментов на мишенях с известными параметрами шероховатости, часть результатов которых, касающаяся спектральных зависимостей энергии излучения, опубликована в (¹⁰).

2. В настоящей статье приводятся экспериментальные зависимости суммы интенсивностей излучения обеих поляризаций (в плоскости излучения и в перпендикулярной ей плоскости), проинтегриро-

210

нанных по слектру, от угла влета электрона в мишень и от параметров, характеризующих шероховатость поверхности.

В эксперименте использованы электроны с энергией 80 кэв, излучение которых детектировалось в направлениях, близких к направлению нормали к поверхности мишени (в пределах $1,5^{\circ} \leq \theta \leq 7,5^{\circ}$), за исключением случая нормального влета электрона; при нормальном влете ($\psi = 0$) угол наблюдения θ равен 52,5°. В качестве параметра, характеризующего шероховатость поверхности, выбрано R_a – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля от средней линии. Использованы мишени, величина параметра R_a которых меняется в широком интервале от 0,005 до 4,6 мкм (см. таблицу). Значения средних шагов неровностей поверхности заклю-



1 2 3 4 5 6 7 8 9	0.005 0.014 0.032 0.067 0.152 0.240 0.530 1.112 1.920 4.600	0,005 0,019 0,037 0,067 0,155 0,320 0,620 0,980 2,500	0.007 0.018 0.035 0.055 0.140 0.232 0.482	5,0 8,0 8,9 9,7 11,0 12,5 13,8 18,5 25,0 20,0	5,0 7,8 8,5 9,7 11,5 12,4 13,7 20,0 25,0	5,0 8,2 8,9 9,2 11,0 13,0 13,8	зачерненный квадраг
10	4,600	21000		30,0	2010		

чены в интервале 5—30 мкм. Другие подробности экспериментального характера приведены в (^{10,11}).

На рис. 1 показана зависимость от параметра Ra интегральной по спектру (320 нм </ > 580 нм) интенсивности излучения для разных углов влета электрона (значки на рисунках представляют данные эксперимента, кривые проведены для наглядности картины). Значения интенсивности излучения для Al и Ag сравнимы между собой и превышают интенсивность излучения для Ge. В случае нормального влета электрона выявить какую-либо зависимость интенсивности нзлучения от степени шероховатости на основе экспериментальных данных не представляется возможным. Заметим, что при $\psi = 0$ интенсивность для наиболее гладких поверхностей (крайние левые точки на графике) в пределах экспериментальных ошибок (15%) согласуется с интенсивностью переходного излучения для случая идеально гладкой границы раздела вакуум-среда. С ростом угла 🖓 зависимость от Ra становится более выраженной. Максимум интенсивности (превышающий интенсивность переходного излучения при таких же ψ и θ в 10⁴—10⁸ раз, а при $\psi = 0$, $\theta = 52,5$ в 10—17 раз) приходится на область Ra=0,04-0,10 мкм. Слева от максимума интенсивность спадает значительно резче, чем справа, в области больших Ra. Это означает, что выход излучения особенно чувствителен к изменению высоты неровностей в области слабой шероховатости.

211

Кривые зависимостей интенсивности излучения от угла скольжения $i=90^{\circ}-\psi$ в области $\psi \ge 45^{\circ}$ изображены на рис. 2. Интенсивность излучения, детектированного при $\psi = 45^{\circ}$ для мишеней первой группы (см. таблицу), на порядок превышает ожидаемую согласно





теории переходного излучения от идеально гладкой поверхности при таких углах влета и наблюдения, но меньше максимальной интенсивности переходного излучения при $\psi = 0$. Однако для мишеней групп 4—9 при всех углах влета электрона в мишень детектируется излучение, значительно превышающее максимум интенсивности переходного излучения. Как следует из данных рис. 2, при $\psi = 45^{\circ}$ интенсивность для мишеней групп 4—9 практически не зависит от степени шероховатости поверхности, что хорошо видно и на рис. 1 (Al и Ge). С ростом угла влета (с уменьшением *i*) интенсивность излучения существенно увеличивается, причем по-разному для мишеней с различной степенью шероховатости поверхности. Интенсивность излучения с увеличением угла влета ψ растет тем сильнее, чем меньше номер группы мишени. Например, для мишеней четвертой 212 группы эту зависимость можно представить как ~i^{-1/2}. Для мишеней же первой и второй групп она существенно усиливается.

Представленные результаты эксперимента показывают, что излучение нерелятивистских электронов на неровностях поверхности вещества в оптической области частот обнаруживает явную зависимость интенсивности как от степени шероховатости поверхности, так и от угла влета частицы в нее.



Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения ог угла скольжения (обозначения см. в таблице)

3. Выше уже отмечалось, что попытки объяснить большую интенсивность экспериментально наблюденного свечения некоторыми механизмами излучения не дали удовлетворительного результата. Для косвенного подтверждения и интерпретации экспериментальных результатов авторы сравнили свои данные с результатами эксперимента (12), который был специально поставлен для исследования излучения заряженной частицы, пролетающей над дифракционной решеткой, и показали (10), что выход излучения в обоих экспериментах одного порядка. Это сравнение подтвердило нашу уверенность в том, что физической причиной интенсивного свечения электрона на шероховатой поверхности является излучение частицы на неровностях, образующих эту поверхность. В связи с этим нами проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами, основанными на некоторых моделях излучения заряженной частицы, движущейся над неровной поверхностью. Следует оговорить: все теоретические модели, приведенные ниже, являются только некоторым приближением к реальным условиям эксперимента и их применение для оценки интенсивности излучения носит полуколичественный характер. При движении заряженной частицы над проводящей неровной поверхностью возникают дополнительные потери, вызванные тем, что наведенное зеркальное изображение заряда движется неравномерно. В (13) Бассом и Ханкиной дана формула для спектральной плотности потерь энергии на единичный частотный интервал заряженной частицей, равномерно движущейся в вакууме над идеально проводящей статистически неровной поверхностью. Теория (13) накладывает некоторые условия, которые в наших экспериментах не выполняются. Так 213

например, формула описывает излучение частицы, летящей параллельно средней поверхности, причем минимальное прицельное расстояние ограничено снизу, в то время как в эксперименте электроны движутся к поверхности под определенным углом. Эти и некоторые другие ограничения не позволяют использовать формулу (¹³) для количественного сравнения с настоящим экспериментом в широком диапазоне высот неровностей. Тем не менее, ввиду отсутствия других формул такое сравнение проведено. Результаты расчетов по (¹³) для одной длины волны и соответствующие экспериментальные данные приведены на рис. З. Как видно из рисунка, для области средних значений высот неровностей экспериментальные значения по порядку величины согласуются с теоретически ожидаемыми.





Рис. 3. Спектральная плотность энергии излучения. $\lambda = 500$ нм, $\psi = 88.5^{\circ}$; — АІ, — Ад, X—Ge; кривая рассчитана по (13)

В (¹⁴) получена общая формула для интенсивности излучения заряженной частицы, совершающей нерегулярно-периодическое колебание поперек прямолинейной траектории движения, которую авторы, в частности, применили для объяснения результатов работ (^{4,5}). Ее с некоторыми оговорками можно применить к движению зарядаизображения и в нашем случае. Вычисления по (¹⁴) для области

*R*_a<2 · 10⁻⁶ см дают результат, очень близкий к кривой, рассчитанной по (¹³).

Аналогичный результат дает, наконец, сравнение эксперимента с теорией излучения заряженной частицы, пересекающей под произвольным углом неровную границу раздела двух сред с разными диэлектрическими проницаемостями (^{15,16}). Оценка интенсивности излучения по формулам (¹⁵), выведенным для границы раздела с регулярными неровностями, дает значения, по порядку величины согласующиеся с экспериментальными.

Таким образом, мы приходим к выводу о том, что "аномально" большая интенсивность излучения электрона, возникающая при скользящем влете частицы в металлическую поверхность, может

214

од электро.

быть объяснена с точки зрения излучения заряда, влетающего под большим углом в неровную проводящую поверхность.

Авторы выражают благодарность академику АН Армянской ССР М. Л. Тер-Микаеляну и Р. А. Багияну за полезные обсуждения по интерпретации результатов эксперимента.

Армянский педагогический институт им. Х. Абовяна Ереванский политехнический институт им. К. Маркса Ереванский государственный университет

Գ. Ռ. ՀԱԲՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ա. Խ. ՄԽԻԹԱՐՅԱՆ, Ռ. Ա. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Բ. Հ. ՌՈՍՏՈՄՅԱՆ

Խորդուրորդ սանմանով էլեկտրոնների անցման դեպքում առաջացող օպտիկական նառագայթման սպեկտրով ինտեգրված բնութագրերը Հետազոտված է 80 կէվ էներգիա ունեցող էլեկտրոնների ճառագայթումը

օպտիկական տիրույթում (320—580 նմ) խորդուբորդության տարբեր աստիճան ունեցող Al, Ag և Ge մակերևույթների վրա։

Չափված է ճառագայԹման ինտենսիվուԹյան կախվածուԹյունը մակերևույԹի անհարԹուԹյունների բարձրուԹյունից (0,005—4,6 մկմ) և էլեկտրոնի անկման անկյունից (0—88,5°)։ Առավելագույն ինտենսիվուԹյունը դիտվում է անհարԹուԹյունների բարձրուԹյան 0,04—0,10 մկմ տիրույԹում և անկման 87° և 88,5° անկյունների դեպքում։

Կատարված է փորձարարական արդյունջների կիսաջանակական համեմատում որոշ տեսական մոդելների հաշվարկների հետ։ Համեմատումը ցույց է տալիս, որ ճառագայԹման մեծ ինտենսիվությունը կարող է բացատրվել մեծ անկյան տակ անհարթ հաղորդիչ մակերևույթի մեջ մտնող լիցքավորված մասնիկի ճառագայթման տեսությամբ։

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ В. Гинзбург, И. Франк, ЖЭТФ, т. 16, 15 (1946). ² С. Михаляк, Исследова иие переходного излучения. Дисс., НИИЯФ МГУ, 1961; ЯФ, т. 3, 89 (1966). ³ И. М. Франк, УФН, т. 87, 189 (1965). 4 P. von Blanckenhagen, H. Boersch, D. Fritzsche, e. a., Phys. Lett., vol. 11, 296 (1964). 5 H. Boersch, P. Dobberstein, D: Fritzsche e. a., Zs. Phys., vol. 187, 97 (1965). • G. E. Jones, L. C. Cram, E. T. Arakawa, Phys. Rev., vol. 147, 515 (1966); vol. 153, 455 (1967). Ф. Р. Арутюнян А. Х. Мхитарян, Р. А. Оганесян и др., ЖЭТФ, т. 63, 1151 (1972). ^в F. R Harutyunian, A. Kh. Mkhitarian, R. A. Houhannisian e. a., Phys. Lett., vol. 43A, 107 (1973). 9 Ф. Р. Арутюнян, А. Х. Мхитарян, Р. А. Оганесян и др., ЖЭТФ, т. 65, 1772 (1973); Опт. и спектр., т. 36. 1152 (1974); ФТГ, т. 15, 2184 (1973). 10 Ф. Р. Арутюнян, А. Х. Мхитарян, Р. А. Оганесян и др., ЖЭТФ, т. 77, 1788 (1979). ¹¹ Ф. Р. Арутюнян, А. Х. Мхитарян, Р. О. Овсепян и др., ЖЭТФ, т. 62, 1263 (1973). 12 J. L. Bret, J. P. Bachheimer, C. R. Acad. Sci., vol. 266, B 902 (1968); vol. 269, В 285 (1969). 13 Ф. Г. Басс, С. И. Ханкина, Изв. вузов СССР. Раднофизика, т. 5, 174 (1962). 14 Л. А. Геворгян, Н. А. Корхмазян, Изв. АН АрмССР. Физика, т. 16, 349 (1981). 15 Р. А. Багиян, ДАН АрмССР, т. 55, № 2 (1972). 16 Р. А. Багиян. М. Л. Тер-Микаелян, ЖЭТФ, т. 81, 1249 (1981).

215