

ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ, СТИМУЛИРОВАННОЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПЛАЗМАМИ

О.П.Балкашин, М.К. Янсон, Ю.Г.Найдюк

Экспериментально обнаружено увеличение проводимости туннельных контактов при облучении лазером. Величина добавки к туннельному току зависит от рода металла, полярности приложенного напряжения, длины волны и поляризации оптического излучения. Результаты интерпретируются как следствие неупругого взаимодействия туннелирующих электронов с плазмонами металлического электрода.

Недавно Лэмб и Маккарти сообщили об излучении света в широком спектральном диапазоне при неупругом туннелировании электронов в пленочных структурах металл — диэлектрик — металл [1]. При данном смещении на контакте V максимальная частота излучения соответствовала квантовому соотношению $h\nu_{\text{макс}} = eV$. Можно ожидать, что при облучении контакта светом должен существовать обратный эффект, заключающийся в изменении туннельного тока при напряжениях $eV > h\nu$, механизм которого аналогичен прямому эффекту Лэмба — Маккарти. Обнаружение и исследование этого обратного эффекта представляет интерес для выяснения механизма описанных явлений.

Целью настоящей работы является обнаружение фотоиндуцированного туннельного тока, обусловленного неупругим взаимодействием электронов и фотонов с поверхностными плазмонами, которое привлекалось Лэмбом и Маккарти для объяснения своих результатов. Трудность выделения указанного эффекта обусловлена присутствием других механизмов изменения туннельного тока под влиянием света, не связанных с плазмонами [2 — 3]. Поэтому нами исследовались зависимости величины добавки к току от рода металла, полярности приложенного напряжения, длины волны и поляризации излучения.

Туннельные контакты с базовым электродом из Al или Mg приготавливались на сапфировых подложках конденсацией в вакууме. Толщина базовой пленки составляла $\sim 1000 \text{ \AA}$. Верхняя пленка из Ag, Al, Cu, Mg или Sn, через которую облучался контакт, делалась полупрозрачной с толщиной 100 — 300 \AA , а ее пропускание измерялось на микрофотометре. Толщина слоя окисла составляла 30 — 40 \AA . Сопротивление туннельных контактов при нулевом смещении находилось в пределах от нескольких единиц до десятков мегом. Все измерения выполнены при температуре 77К. Образцы помещались непосредственно в жидкий азот, либо находились в атмосфере газообразного гелия. Излучение от He — Ne-лазера ($\lambda_1 = 0,63 \text{ мкм}$ и $\lambda_2 = 1,15 \text{ мкм}$) вводилось в криостат по световоду или через боковые стенки. Полезный сигнал δI регистрировался схемой синхронного детектирования с модуляцией интенсивности луча лазера с частотой 420 гц. В опытах записывались

вольт-амперная характеристика $V(I)$ без облучения и величина переменного напряжения $\delta V(I)$, возникающего на образце под действием внешнего излучения. По этим зависимостям рассчитывалась производная $dI/dV(V)$ и значения добавки к туннельному току $\Delta I(V)$ [4]. Измерения выполнялись только на контактах с четко выраженной асимметрией вольт-амперных характеристик при больших смещениях, свидетельствующей о туннельном характере протекающего тока.

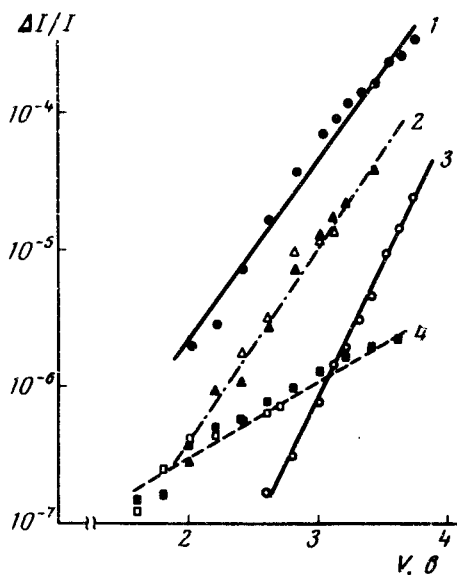


Рис. 1. Относительное возрастание туннельного тока под действием облучения в зависимости от смещения на контакте Al-Ag ($1 - \lambda_1 = 0,63$ мкм, $3 - \lambda_2 = 1,15$ мкм), Al-Al ($2 - \lambda_1 = 0,63$ мкм), Al-Cu ($4 - \lambda_1 = 0,63$ мкм ■, $\lambda_2 = 1,15$ мкм □). Плотность мощности облучения 70 мвт/см²

На рис. 1 представлены зависимости относительной величины добавки к туннельному току $\Delta I/I$ от напряжения. Величина $\Delta I/I$ линейно зависела от мощности падающего излучения, а знак δV изменялся при изменении направления тока через контакт. Кривые на рис. 1 нормированы на одинаковую интенсивность облучения базовой Al-пленки. Полярность напряжения такова, что электроны туннелируют из нижней пленки Al в верхнюю из Ag или Cu. При обратной полярности значения $\Delta I/I$ для этих контактов в 30 - 50 раз меньше, что позволяет пренебречь влиянием обычного нагрева под действием излучения. Характеристики контактов Al - Sn имеют аналогичный вид и на рис. 1 не показаны. Обычно величина $\Delta I/I$ больше для более коротковолнового света.

Для контакта Al-окисел Al - Al $\Delta I/I$ не зависит от полярности (черные и светлые треугольники на прямой 2). С другой стороны, из подобия вольт-амперных характеристик контактов Al - Al и Al - Ag следует, что форма потенциального барьера у этих контактов приблизительно одинакова. Следовательно наблюдаемые различия зависимостей $\Delta I/I(V)$ относятся к процессам, происходящим в верхней металлической пленке (Ag).

Для того, чтобы обнаружить взаимодействие света с поверхностными плазмонами, была измерена зависимость δV от угла падения θ излучения на контакт для p и s поляризаций при постоянном смещении $V = 3,9$ в. Оказалось, что δV_p и δV_s , имеющие при $V = 0$ одинаковую величину, уменьшаются при возрастании θ не одинаковым образом. При-

веденная к $\delta V(\theta = 0)$ разность этих величин изображена на рис. 2. Аналогичная зависимость для $V = 0$ была получена в работе [5], в которой энергия фотона совпадала с энергией плазменных колебаний в Ag. В нашем случае энергия фотона (1,97 эв) меньше энергии объемного плазмона Ag (3,8 эв) и, по-видимому, соответствует возбуждению низколежащих поверхностных плазмонов.

$\delta V_p - \delta V_s$, отн. ед.

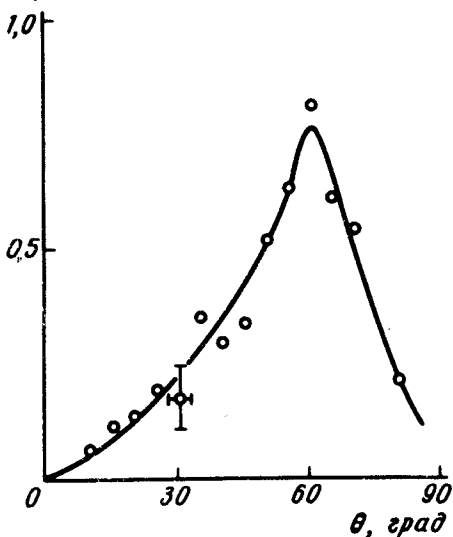


Рис. 2. Угловая зависимость приведенных к $\theta = 0^\circ$ значений разности напряжений на контакте, индуцированных светом $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$, для p и s -поляризаций падающего излучения. Контакт Al—Ag

Таким образом, электроны, туннелирующие из Al в Ag (Cu, Sn), возбуждают низколежащие плазмоны, что приводит к добавке в туннельный ток, обусловленной этими неупругими процессами. Прозрачность такого неупругого канала туннелирования зависит от внешнего излучения за счет взаимодействия света с плазмонами, что следует из рис. 2. С этой точки зрения становится понятным независимость эффекта в Cu от длины волны света (кривая 4 на рис. 1), а также отсутствие эффекта в контактах Al-окисел Al—Mg Mg-окисел Mg—Al, Al—Al. В первом случае необходимо учесть, что частота поверхностных плазмонов в Cu лежит вблизи 2 эв. Во втором случае — принять во внимание что частоты поверхностных плазмонов для Al и Mg лежат вдали от частоты падающего излучения (5—10 эв). Следует, однако, отметить, что фотоиндуцированные токи не были обнаружены нами и в контактах Mg-окисел Mg—Al, что, по-видимому, отчасти обусловлено малостью времени релаксации "горячих" электронов в Mg по сравнению с Al. Все отмеченные выше экспериментальные результаты хорошо воспроизводились на различных контактах одного и того же типа.

В заключение отметим, что несмотря на указанные выше исключения, представляющие самостоятельный интерес, полученные результаты определенно свидетельствуют об участии плазмонов в механизме возникновения фотоиндуцированных туннельных токов.

Литература

- [1] J.Lambe, S.L.McCarthy. Phys.Rev.Lett., 37, 923, 1976.
 - [2] A.Braunstein, M.Braunstein, G.S.Picus, C.A.Mead. Phys.Rev.Lett., 14, 219, 1965.
 - [3] Z. Burshtein, J.Levinson. Phys.Rev., B12, 3453, 1975.
 - [4] О.П.Балкашин, И.К.Янсон, А.В.Хоткевич. ЖЭТФ, 72, 1182, 1977.
 - [5] R.K.Jain, C.W.Slayman, M.G.Farrier, T.K.Gustafson. J.Appl. Phys., 48, 1543, 1977.
-