

О НАБЛЮДЕНИИ КВАНТОВЫХ РАЗМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ  
В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ВИСМУТА

Д.Ф.Огрин, В.Н.Луцкий, М.И.Елинсон

Как известно [1], для пленок металлов и полупроводников, толщина которых ( $d$ ) сравнима с эффективной длиной волны ( $\lambda$ ) носителей

тока, в поведении последних должны проявляться квантовые эффекты. В частности, кинетические и гальваномагнитные коэффициенты должны осциллировать при изменении толщины пленок. Эти осцилляции аналогичны осцилляциям тех же величин в квантующем магнитном поле. Указанные эффекты проявляются особенно сильно при низких температурах.

Для наблюдения этих квантовых размерных эффектов, кроме выполнения условия  $\lambda/d \geq 1$ , необходимо, чтобы длина свободного пробега носителей тока ( $\ell$ ) была больше толщины пленки. Естественно в качестве объекта исследования выбрать материал с зеркальным рассеянием носителей тока от границ пленок.

Из исследованных в данное время веществ, по-видимому, наиболее полно удовлетворяет этим требованиям висмут, для которого  $\ell$  при  $4,2^\circ\text{K} \sim 1$  мм [2] и рассеяние от границ образца зеркальное [2].

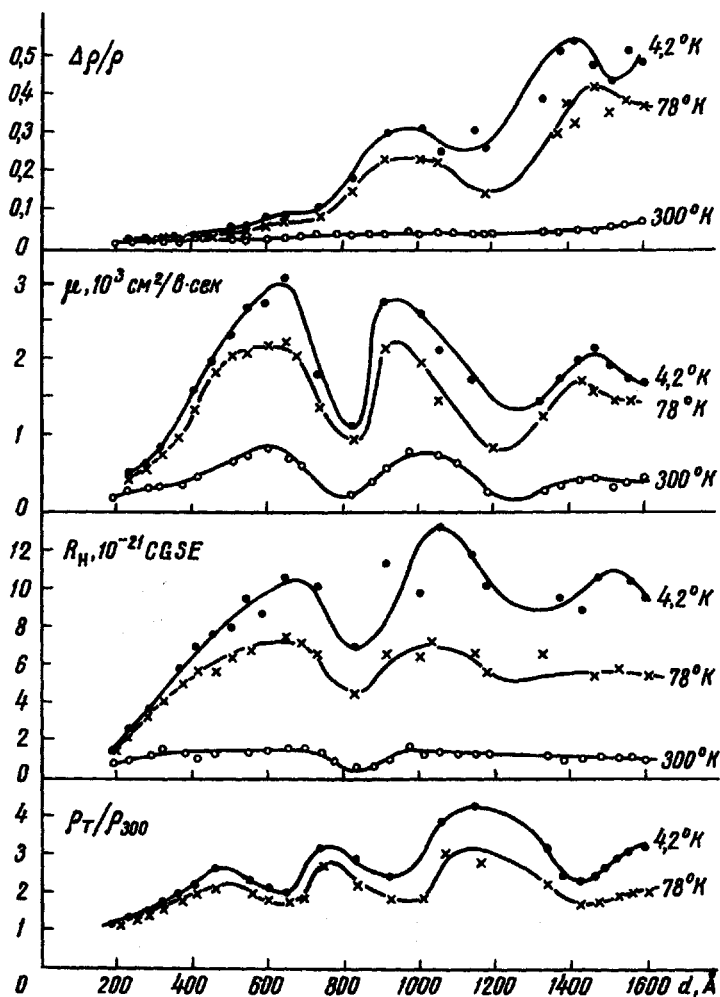
Известно [3], что в тонких пленках  $\text{Bi}$ , полученных вакуумным напылением на горячую слюду, кристаллиты ориентированы тригональной осью нормально к поверхности. Компонента эффективной массы ( $m_x^*$ ), соответствующая этому направлению, имеет величину  $\sim 0,01 m_0$ , а значение энергии Ферми ( $\epsilon_F$ ) для  $\text{Bi}$   $0,02$  эв [4], что позволяет выполнить условие  $\lambda/d \geq 1$  при разумных значениях  $d$ . Следует также отметить, что висмут является полуметаллом с малым перекрытием зон и одним из проявлений квантовых размерных эффектов должен быть переход его в диэлектрик (низкие температуры) при уменьшении толщины, что должно сказаться на кинетических, гальваномагнитных и оптических (5) явлениях.

Нами исследовалась толщинная зависимость удельного сопротивления ( $\rho$ ), постоянной Холла ( $R_H$ ) и магнетосопротивления ( $\Delta\rho/\rho$ ) пленок  $\text{Bi}$  при  $300$ ,  $78$  и  $4,2^\circ\text{K}$  (магнитное поле перпендикулярно плоскости пленки). Пленки изготовлялись напылением чистого (99,9999%)  $\text{Bi}$  в вакууме  $10^{-6}$  мм рт.ст. на слюду, нагретую до  $70 + 80^\circ\text{C}$  при скорости напыления  $\sim 50$  Å/мин. Для уменьшения разброса измеряемых величин из-за неидентичности подложек проводилось напыление на одну подложку 12 образцов различной толщины. Толщина самого толстого образца измерялась обычным интерференционным микроскопом, толщины ос-

тальных определялись по времени напыления (скорость напыления считалась постоянной).

Электроннографические исследования показали, что структура пленок обладала текстурой с разориентировкой кристаллитов, не превышавшей  $10-15^\circ$ .

Измерения  $\rho$ ,  $\Delta\rho/\rho$  и холловской э.д.с. проводились компенсационным методом. Величина магнитного поля при измерениях составляла 8 кэ.



Толщинные зависимости  $\rho_T/\rho_{300}$ ,  $\Delta\rho/\rho$ ,  $R_H$  и холловской подвижности  $\mu_x = R_H/\rho$  приведены на рисунке. Характерной особенностью приведенных кривых является наличие осцилляций всех измеряемых вели-

чин в зависимости от толщины пленок. Расстояние между соседними максимумами (или минимумами) составляет  $\Delta d \approx 400 + 500 \text{ \AA}$ . Амплитуда осцилляций растет с понижением температуры. Для зависимостей  $R_H(d)$  и  $\Delta\rho/\rho(d)$  характерным также является монотонное уменьшение этих величин при  $d \rightarrow 0$  (для  $d < 600 \text{ \AA}$ ). Отметим, что при  $d < 400 \text{ \AA}$   $\rho$  быстро возрастает с уменьшением толщины.

Считая полученные осцилляции проявлением квантовых размерных эффектов, можно, используя экспериментально измеренный период осцилляций, оценить эффективную массу носителей тока по формуле:

$$\Delta d = \frac{\pi \hbar}{\sqrt{2m_x^* \epsilon_F}} .$$

Предполагается, что  $m_x^*$  не зависит от  $d$ ,  $\epsilon_F$  - энергия Ферми массивного образца, равная 0,02 эв. Подставив в это выражение  $\Delta d = 400 \text{ \AA}$ , получим  $m_x^* = 0,011 m_0$ , что совпадает с известным [4] значением компоненты эффективной массы, соответствующей тригональной оси. Быстрый рост  $\rho$  с уменьшением  $d$  в области  $d < 400 \text{ \AA}$  можно интерпретировать как переход полуметалла в диэлектрик. Однако такая интерпретация требует дополнительных исследований, так как к такому же эффекту приводит, например, появление разрывов в пленках в этой области толщин.

Учитывая все сказанное, можно с большой вероятностью предположить, что полученные эффекты являются квантовыми размерными эффектами.

Тем не менее настоящее сообщение следует считать предварительным. Для подтверждения вышесказанного предположения мы проводим в настоящее время исследования при больших толщинах пленок, когда условие  $\lambda/d \geq 1$  не соблюдается. Кроме того, проводятся необходимые контрольные исследования структуры пленок в широком интервале толщин.

Представляют также интерес измерения зависимости  $R_H$  и  $\Delta\rho/\rho$  от ориентации и величины магнитного поля, а также измерения, дающие возможность строго обнаружить переход полуметаллической пленки в диэлектрическую при уменьшении  $d$ .

Авторы глубоко признательны В.Б. Сандомирскому за обсуждение работы, Р.Н.Шефтали за проведение структурного анализа и Е.С.Барановой за помощь в проведении измерений.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
10 декабря 1965 г.

#### Литература

- [1] И.М.Лифшиц, А.М.Косевич. Изв.АН СССР, сер.физ., 19, 395, 1955;  
В.Б.Сандомирский. Радиотехника и электроника, 7, 1971, 1962;  
Б.А.Тавгер, В.Я.Демиховский. Физ.твердого тела, 5, 644, 1963.
- [2] A.N.Friedman, S.H.Koenig. J.res. and develop, 4, 158, 1960.
- [3] W.Busse, F.Gross, K.Herman. Z. Phys., 64, 537, 1930.
- [4] Morrel H.Cohen. Phys. rev., 121, 387, 1961.
- [5] В.Н.Луцкий. Письма ЖЭТФ, 2, 391, 1965.