

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПЕРКОЛЯЦИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ PbS

О.А.Гудаев, В.К.Малиновский, Э.Э.Пауль

Показано, что фрактальные свойства перколяционного кластера могут проявляться в нелинейной связи фотопроводимости и времени жизни фотовозбужденных носителей. Экспериментально эффект обнаружен на поликристаллических пленках PbS.

Эффективным при анализе переноса заряда в материалах, обладающих сильной пространственной неоднородностью свойств, оказывается использование перколяционных представлений. Исходя из алгоритма построения перколяционных кластеров видно, что они должны обладать фрактальной структурой. Возникает вопрос, к каким наблюдаемым следствиям может привести учет фрактальных свойств перколяционных кластеров, определяющих перенос заряда в материалах с сильно неоднородными свойствами.

Рассмотрим перенос заряда в материале, для которого выполняется условие $l \sim a, l$ - длина свободного пробега, a - межатомное расстояние ($\mu \sim 1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Воспользуемся подходом предложенным Козном М. ¹. Он рассматривал движение как диффузионное или броуновское. При этом локализации нет, но движение не может рассматриваться как свободное.

Особенности диффузионных процессов на фрактальном кластере исследованы в ². Показано, что коэффициент диффузии на фрактале в общем случае является функцией расстояния

$$Dg(r) \sim r^{-\theta}, \quad \theta = 2(D/d - 1).$$

Здесь D - фрактальная или хаусдорфова размерность, d - спектральная размерность. При случайном блуждании по фракталу расстояние r , на которое уйдет частица через время t , зависит от t по закону $\langle r^2 \rangle \sim t^{d/D}$. Рассмотрим фотопроводимость полупроводника в том случае, когда перенос неравновесных носителей осуществляется по перколяционному кластеру, обладающему фрактальной структурой. Для неравновесного носителя время блуждания по фракталу равно его времени жизни. Вообще говоря, в дальнейшем следовало бы учесть статистику распределения времени жизни носителей, однако, в первом приближении будем считать, что время жизни всех неравновесных носителей равно его среднему значению τ . Учитывая это для коэффициента диффузии получим следующее выражение

$$Dg(r) \sim r^{-\theta} \sim r^{-2(D/d-1)} \sim r^{(1-d/D)}.$$

Для оценки подвижности используем соотношение Эйнштейна $\mu = eDg/kT$. Величина фотопроводимости определяется произведением подвижности на концентрацию возбужденных светом носителей $\sigma_p \sim \mu \Delta p$, причем $\Delta p \sim \tau$. Окончательно для величины фотопроводимости получим следующее выражение, устанавливающее связь фотопроводимости с временем жизни неравновесных носителей

$$\sigma_p \sim \tau^p, \quad p = (2 - d/D).$$

Для перколяционных систем параметр d имеет универсальное значение $d = 4/3$ ². Для оценки фрактальной размерности необходимы дополнительные сведения. Таким образом следует ожидать, что в том случае, если при переносе заряда по перколяционному кластеру проявляются его фрактальные свойства, фотопроводимость должна нелинейным образом быть связана с временем жизни возбужденных светом носителей, т.е. $\sigma_p \sim \tau^p$, $p \geq 1$.

Для проверки сделанных выше выводов необходим обладающий светочувствительностью материал, перенос заряда в котором определяется движением носителей по перколяционному кластеру. Ранее^{3,4} было показано, что такими свойствами обладают поликристаллические пленки PbS. Время жизни неравновесных носителей в этих пленках и величина фотопроводимости сильно зависят от температуры образца (рис.1). Измеряя σ_p и τ пленок при разных температурах и интенсивностях I , есть возможность проверить взаимосвязь этих параметров в довольно широких пределах. Как было показано⁵ действие света на химически осажденные слои PbS приводит к изменению концентрации основных носителей. Величина фотопроводимости определяется произведением следующих параметров $\sigma_p = e\alpha I \mu(T, \tau) \tau$, где e - заряд носителя, I - интенсивность света, α - коэффициент поглощения. Для того, что не учитывать зависимость от температуры коэффициента поглощения, измерения проводились при энергиях падающих квантов света больших, чем ширина запрещенной зоны PbS (950 нм), т.е. в той области, где зависимостью поглощения от температуры, обусловленной сдвигом края фундаментального поглощения, можно пренебречь. Для того, чтобы исключить зависимость подвижности от температуры, σ_p - при каждой заданной температуре нормировалась на темновую проводимость σ_d . При этом величина $\sigma_p^* = \sigma_p / I \sigma_d$ зависит только от τ .

Измерение времени жизни неравновесных носителей производилось по спаду фототока при импульсном возбуждении. На рис.2 приведена зависимость σ_p^* от τ для нескольких интенсивностей возбуждающего света. При этом оказалось, что для сравнительно небольших интенсивностей зависимость σ_p^* от τ линейна ($p = 1$), что соответствует обычным представлениям теории фотопроводимости в полупроводниках (кривые 1,2,3, рис.2). Однако при более высоких интенсивностях (кривые 4,5, рис.2) получено ($p = 1,3$ и $p = 1,6$ соответственно). Этот

результат указывает на то, что в определенных условиях (в данном случае при достаточно интенсивном возбуждении) в проводимости проявляются фрактальные свойства перколяционного кластера.

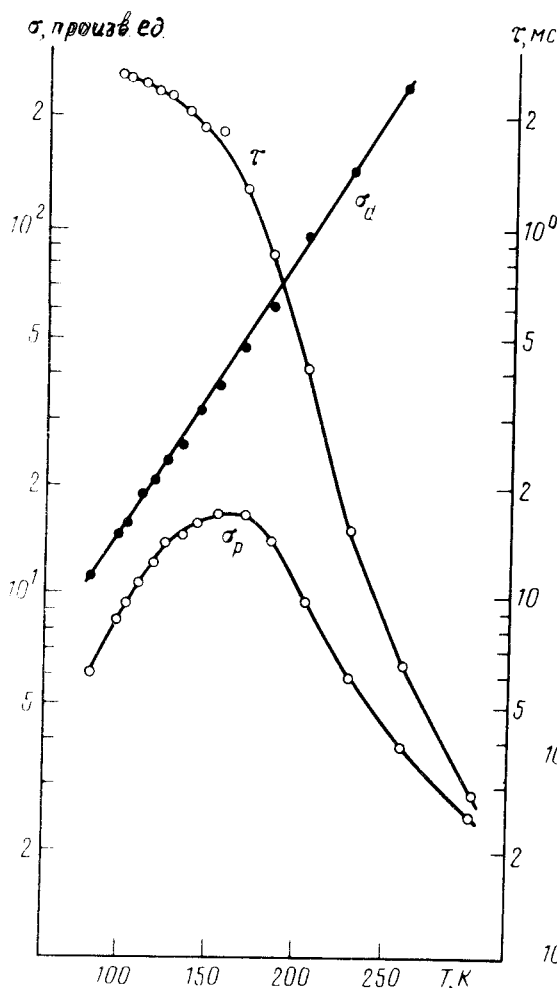


Рис.1

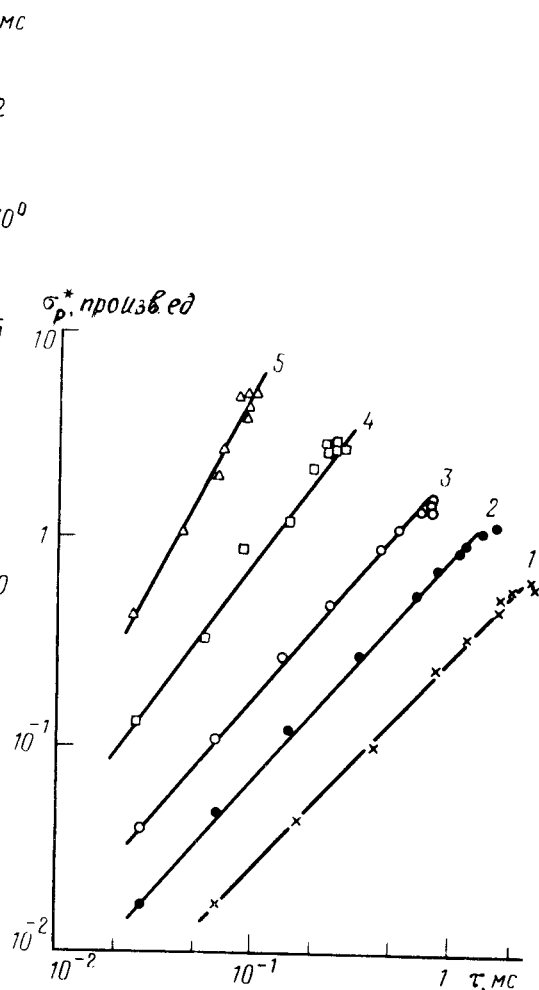


Рис.2

Рис. 1. Температурная зависимость фотопроводимости σ_p , темновой проводимости σ_d и времени жизни неравновесных носителей τ

Рис. 2. Зависимость фотопроводимости от времени жизни неравновесных носителей для разных уровней интенсивности света: 1 — $1,4 \cdot 10^{-2} I_0$; 2 — $4,0 \cdot 10^{-2} I_0$; 3 — $9,2 \cdot 10^{-2} I_0$; 4 — $3,5 \cdot 10^{-1} I_0$; 5 — I_0

Особенности роста поликристаллических пленок PbS при химическом осаждении приводят к случайному неоднородному распределению более и менее фоточувствительных областей (например, окислов) по объему образца. По-видимому, рост интенсивности света приводит к возрастанию разброса сопротивлений соседних участков и перенос заряда приобретает ярко выраженный перколяционный характер.

Литература

1. Cohen M.H. J. Non-Cryst. Solids, 1970, 36, 391.

2. *Orbach R.J.* Stat.Phys., 1984, 36, 735.
3. *Gudaev O.A. et al.* Solid. Stat. Comm., 1989, 72, 791.
4. *Gudaev O.A. et al.* Solid. Stat. Comm., 1990, in press.
5. *Woods J.F.* Phys.Rev., 1957, 106, 235.

Институт автоматике и электрoметрии
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступила в редакцию
30 июля 1990 г.