

КОМПЕНСИРОВАННЫЙ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ *n*-ГЕРМАНИЙ –  
КАК МОДЕЛЬ АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

А. Р. Гаджиев, С. М. Рыский, И. С. Шлимак

Как известно, явления переноса в аморфных (стеклообразных) полупроводниках существенно отличаются от кристаллических: в них, в частности, наблюдаются аномально малая "холловская" подвижность, нелинейная *S*-образная вольт-амперная характеристика, непрерывно понижающаяся с уменьшением температуры энергия активации проводимости [ 1]. В последнее время развиваются представления о том, что физические свойства аморфных полупроводников определяются наличием в них хаотических флуктуаций потенциала, масштаб которых сравним с шириной запрещенной зоны [ 2, 3]. Аналогичный рельеф потенциала существует, как известно, и в кристаллических полупроводниках в случае сильной компенсации за счет хаотического распределения заряженных примесей. Меняя степень легирования и компенсации можно, как показано в [ 4] создать управляемую модель аморфных полупроводников, поскольку при этом изменяются как амплитуда и размеры областей флуктуаций потенциала, так и положение уровня Ферми.

Отметим, однако, что создание флуктуаций за счет Пуассоновского распределения точечных дефектов и примесей приводит к жесткой связи между средними размерами и среднеквадратичными значениями амплитуд флуктуаций. В этом смысле способ создания модели аморфных полупроводников за счет хаотического распределения точечных дефектов имеет ограничения. Новые возможности для создания управляемой модели аморфных полупроводников возникают за счет использования облучения ядерными частицами высокой энергии, которые создают локальные сгустки дефектов – кластеры. При этом за счет использования ядерных частиц разного сорта и энергий могут создаваться структуры с разнообразными соотношениями между средней амплитудой изменения потенциала и размерами областей нарушения.

В настоящей работе исследован с этой точки зрения сильно легированный германий *n*-типа, облученный быстрыми нейтронами. Как известно, быстрые нейтроны, поглощаясь в германии, создают сферические (в первом приближении) области "разупорядочения", с линейными размерами  $R_0$  примерно 50 – 100 Å, внутри которых германий проявляет свойства материала *p*-типа с усредненной концентрацией акцепторов порядка  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, если облучать быстрыми нейтронами *n*-Ge с концентрацией доноров до  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , то в нем будут создаваться хаотически расположенные области *p*-типа, окруженные изолирующим слоем объемного заряда *n-p*-перехода. Вначале, когда концентрация *N* таких областей мала, они просто "выключаются" из проводимости и приводят к искривлениям линий тока, однако затем, когда  $NR_0^3$  становится порядка единицы, эти области начинают перекрываться так, что образец германия представляет собой объемную

сеть хаотично расположенных электронных и дырочных областей и *n-p*-переходов между ними. Размах флуктуаций потенциала слегка превышает при этом ширину запрещенной зоны.

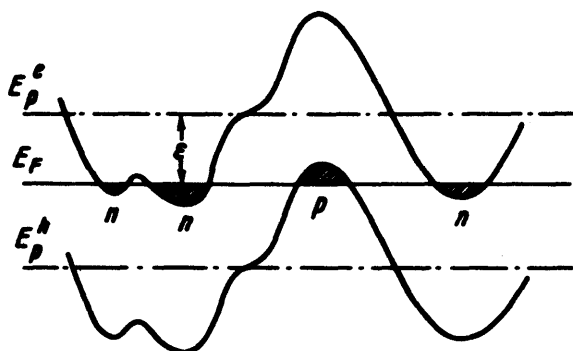


Рис. 1. Ход потенциала вдоль произвольного направления. Заштрихованные области обозначают электронные ( $n$ ) и дырочные ( $p$ ) капли. Размер  $p$ -области соответствует размеру Кластера  $R_0$ .

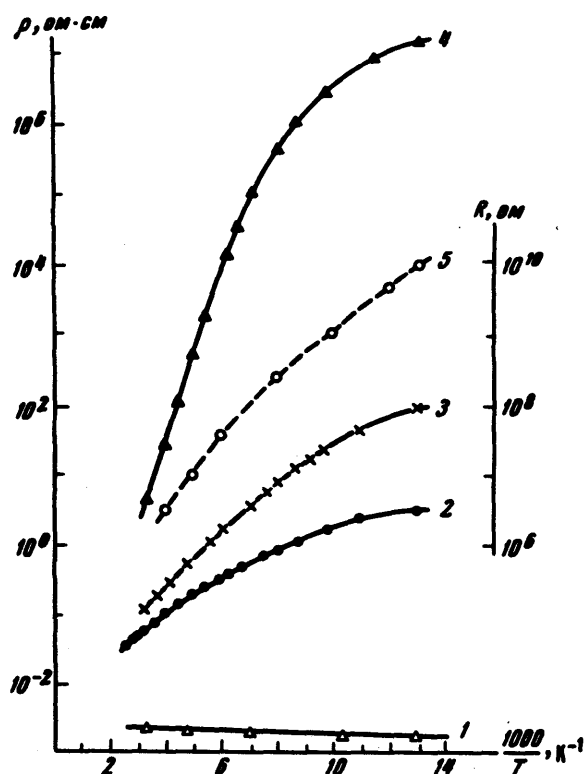


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления: 1 – исходный образец сильно легированного германия; 2 – 4 – образцы, компенсированные различными дозами нейтронного облучения; 5 – сопротивление пленки аморфного германия (правая шкала) [8]

На рис. 1 схематично показан ход потенциала вдоль произвольного направления. Здесь  $E_F$  – уровень Ферми,  $E_p^{e,h}$  – уровни "протекания" для электронов и дырок, т. е. значение энергии, обладая которой носитель заряда впервые может пройти от электрода к электроду "классическим" образом, не туннелируя сквозь горбы потенциала, но огибая их. Из этой модели следует, что проводимость  $\sigma$  должна иметь ак-

тивационный характер, причем в области высоких температур энергия активации равна энергетической разности между уровнем "протекания" и уровнем Ферми и может приближаться к половине ширины запрещенной зоны полупроводника. В области достаточно низких температур должен преобладать туннельный механизм проводимости по состояниям, все более близким к уровню Ферми. Энергия активации  $\epsilon$  должна при этом непрерывно уменьшаться с температурой  $T$  по закону Мотта  $\epsilon \sim T^{3/4}$  или  $\ln \sigma \sim T^{-1/4}$  [5, 6]. Ясно также, что из-за сильной неоднородности образца произведение постоянной Холла на проводимость  $R\sigma$  не имеет ничего общего с подвижностью и может принимать сколь угодно малые значения. Такая система должна иметь, кроме того, нелинейную вольт-амперную характеристику с  $S$ -образным участком. Пробой или, по крайней мере, его начальная стадия может определяться механизмом, описанным в [7].

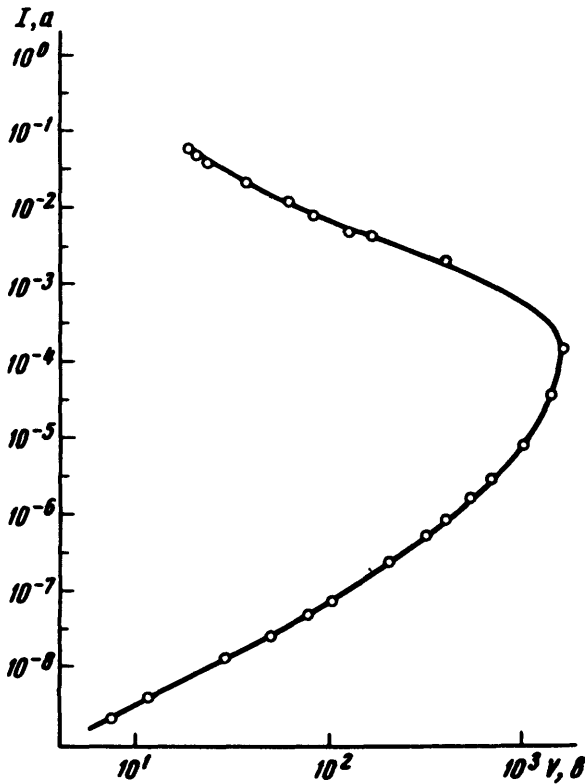


Рис. 3. Статическая вольт-амперная характеристика наиболее компенсированного образца при 77°K

Проведенные нами эксперименты полностью подтвердили высказанные предположения. Облучению быстрыми нейтронами были подвергнуты образцы  $n$ -Ge с концентрацией мышьяка  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Проводимость таких образцов носила металлический характер, т. е. слабо зависела от температуры. Значения удельного сопротивления и подвиж-

ности во всем интервале температур составляли величины порядка  $2 \cdot 10^{-3}$  ом·см и  $5 \cdot 10^2$  см<sup>2</sup>·в<sup>-1</sup>·сек<sup>-1</sup> соответственно. По мере облучения быстрыми нейтронами подвижность резко падала, и в области сильной компенсации ЭДС Холла перестала измеряться. На рис. 2 показаны температурные зависимости удельного сопротивления образцов, получивших различные дозы облучения. Для сравнения приведены температурные зависимости сопротивления исходного образца, а также пленки аморфного германия [8]. Можно видеть, что проводимость приобрела активационный характер, причем у наиболее компенсированного образца в области высоких температур  $\epsilon \approx 250$  мэв, т. е. близка к половине ширины запрещенной зоны германия. Обработка кривых в масштабе  $T^{-1/4}$  показывает, что в области низких температур хорошо выполняется закон Мотта. На рис. 3 показана вольт-амперная характеристика наиболее компенсированного образца, снятая стационарным методом при  $T = 77^\circ\text{K}$ . Можно видеть, что характеристика имеет S-образный вид со значительным участком отрицательного дифференциального сопротивления.

Таким образом, в результате исследования показано, что *n*-германий, облученный быстрыми нейтронами, обнаруживает основные особенности присущие аморфному полупроводнику и в этом смысле может рассматриваться как его модель.

В заключение авторы выражают благодарность Б.И.Шкловскому за обсуждение полученных результатов.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
12 апреля 1972 г.

### Литература

- [ 1 ] N. Mott. Phil. Mag., 24, 190, 911, 1971.
- [ 2 ] H. Fritzsche. J. Non-Cryst. Sol., 6, 49, 1971.
- [ 3 ] Б.И.Шкловский. Письма в ЖЭТФ, 14, 397, 1971.
- [ 4 ] Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос. ЖЭТФ, 62, 1156, 1972.
- [ 5 ] N.Mott. Phil. Mag., 19, 835, ..
- [ 6 ] И.С.Шлимак, Е.И.Никулин. Пис. в ЖЭТФ, 15, 30, 1972.
- [ 7 ] С.М.Рывкин. Письма в ЖЭТФ, данный номер, стр. 632.
- [ 8 ] A.Clark. J. Non-Cryst. Sol., 2, 52, 1970.