

ВНЕСЕНИЕ МЕСТНЫХ ЦЕНТРОВ (УРОВНЕЙ) ПРОВОДИМОСТИ В ПОЛУПРОВОДНИКИ ЯДЕРНОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ

«Моноатомные» полупроводники германий и кремний (назовём их так в отличие от полупроводников, представляющих собой химические соединения) принадлежат к IV группе таблицы Менделеева и имеют кристаллическую решётку типа алмаза. В 1 см^3 кристаллических Ge и Si находится, соответственно, $4,5 \cdot 10^{22}$ и $5,2 \cdot 10^{22}$ атомов. Известно, что добавка примесей из III группы элементов, например бора, алюминия, галлия и индия, вызывает «дырочную» проводимость в Ge и Si. Примеси элементов V группы: азота, фосфора, сурьмы и мышьяка обуславливают избыточную (электронную) проводимость^{1, 2, 3}.

Проводимость полупроводника σ может быть выражена как сумма собственной и примесной составляющих:

$$\sigma = \sigma_{\text{собств}} + \sigma_{\text{примеси}}$$

При температурах порядка 300°K первая обычно ничтожно мала по сравнению со второй. Собственная проводимость чистого кремния — около $4 \cdot 10^{-6} \text{ (ом}\cdot\text{см)}^{-1}$; добавление 1 атома бора на 10^6 атомов кремния увеличивает её почти до $1 \text{ (ом}\cdot\text{см)}^{-1}$, т. е. в $2 \cdot 10^5$ раз. Можно считать, что

$$\sigma = \sigma_{\text{собств}} + nq\mu, \quad (1)$$

где n — число носителей, высвобождаемых атомами примеси.

Из приведённого выше примера влияния атомов примеси на проводимость кремния видно, что методы обычного химического или спектрального анализа не применимы для количественного изучения распределения столь малых количеств примеси в образце.

В этом случае, однако, возможно применение метода радиоактивных индикаторов (см.^{4, 5}), т. е. активных изотопов атомов примеси (например, P или Sb)⁶. В опытах с германием к чистому полупроводнику добавлялись 0,054, 0,00081 и 0,00078% сурьмы. Радиоавтографы пока-

зали, что в слитке германия примесь располагается экспоненциально по глубине, с максимальной концентрацией у поверхности. Измерение активности с помощью счётчиков Гейгера позволило определить концентрацию примесей.

Особенно важным фактом с точки зрения зонной теории твёрдого тела представляется совпадение данных о концентрации примеси и обусловливаемой ею электропроводности: один атом сурьмы в решётке германия даёт один носитель проводимости (рис. 1).

Основное затруднение при экспериментальной проверке теории полупроводимости состоит в получении полупроводников с заранее

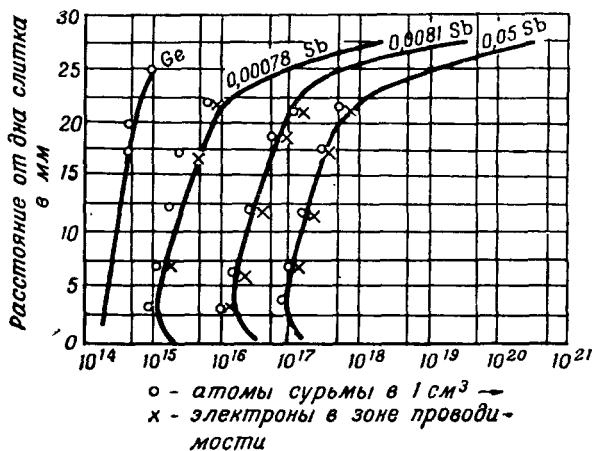


Рис. 1.

предсказанными свойствами при добавлении примеси. Это затруднение было бы разрешено, если бы атомы примеси удавалось «вставлять» в узлы кристаллической решётки, занимавшиеся ранее атомами основного её вещества, без нарушения её строения. Принципиально эта задача может быть решена с помощью облучения чистых полупроводников потоком медленных тепловых нейтронов, дающих в результате ядерной реакции типа (n, γ) β -активные ядра, которые, после своего распада становятся стабильными атомами нового элемента (примеси) в решётке исследуемого полупроводника.

В случае германия число и тип изотопов известны. Ядерные реакции приводят здесь к возникновению атомов галлия, обуславливающего p -проводимость, и мышьяка, атомы которого дают уровни-доноры, вызывающие электронную проводимость.

Соотношение количеств примесных уровней, а следовательно, и возникающая после облучения проводимость, определяется в конечном счёте эффективными поперечными сечениями активации (см., например, 7). Вообще, число актов ядерных взаимодействий

$$N_e = nvt \cdot \sigma_p \cdot n_A - P_i \cdot \omega, \quad (2)$$

где $n \cdot v$ — число бомбардирующих частиц, падающих в секунду на единицу площади, σ_p — эффективное сечение в см^2 , n_A — число атомов в 1 см^3 образца (мишени), P_i — изотопическое содержание участвующих в процессе ядер и ω — коэффициент, учитывающий вторичные эффекты,

сопровождающие процесс. Для ядерных реакций $\omega = 1$, но, например, для упругих соударений ω может доходить до нескольких сотен.

Для германия было установлено, что бомбардировка в ядерном котле в конце концов всегда приводит к преобладанию дырочной проводимости. Если в реакторе облучается образец n -типа, то проводимость его вначале падает и затем, когда все электроны проводимости захватываются возникшими акцепторами, знак носителей меняется, и нарастает p -проводимость (рис. 2).

Переход к дырочной проводимости согласуется, по словам автора опытов⁸, с измеренными Померанцем величинами сечений захвата

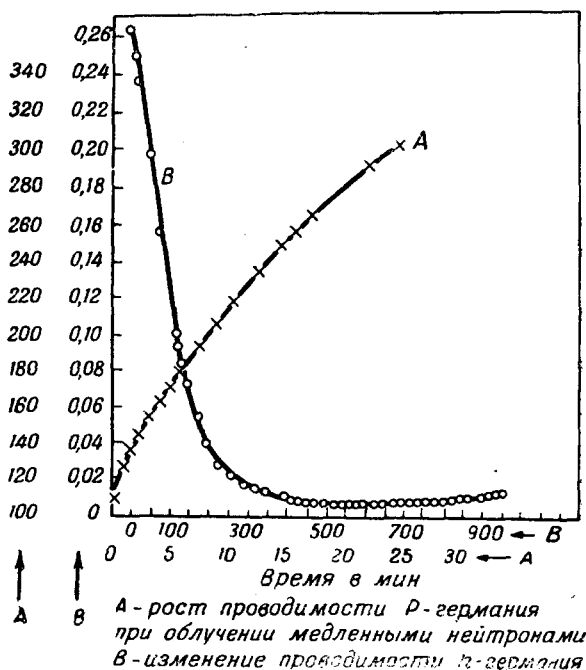


Рис. 2.

медленных нейтронов, разделёнными изотопами германия. Выяснилось, что при плотности потока нейтронов порядка 10^{18} концентрация p -центров, возникающих в чистом германии, при облучении его в течение нескольких часов, того же порядка, что для примеси в практически используемых кристаллах.

Разница в том, что полученный методом ядерных реакций примесный полупроводник может быть «идеальным» (при условии применения чистых монокристаллов).

Как и в опытах с введением радиоактивной сурьмы Sb^{124} , самым существенным выводом из опытов по облучению германия медленными нейтронами представляется тот факт, что полное число возникающих в толще полупроводника атомов соседнего элемента согласуется с точностью до 10% с числом возникающих примесных уровней (уста-

навливаемым из измерения Холл-эффекта). Этим подтверждается предсказание теории о том, что один атом соседнего элемента в узле решётки даёт один носитель проводимости.

В отличие от изменений в полупроводнике, вызываемых медленными нейтронами, бомбардировка заряжёнными тяжёлыми частицами, например дейтеронами, вызывает ряд добавочных эффектов: смещение атомов решётки при соударении с ними быстрой частицы и ионизацию. В некоторых случаях возможны «лавиновые» пертурбации решётки. Указанные явления выражаются во временных изменениях проводимости полупроводника, зависящих в основном от ионизирующей способности падающих частиц. Бомбардировка германия дейтеронами и α -частицами в циклотроне показала, что в этом случае эффект ядерных реакций мал в сравнении со вторичными изменениями (ионизация атомов и пертурбации решётки).

Трудностью в подобных опытах является подготовка достаточно тонкого образца для того, чтобы эффект бомбардировки равномерно имел место во всём его объёме.

Весьма интересной представляется возможность, облучая резко ограниченные участки поверхности полупроводника, получить «бесконтактные» границы n - p , имеющие детектирующие свойства. Такие границы, как известно, можно применять в качестве фотоэлементов и «бесконтактных» полупроводниковых усилителей⁹.

В. Вавилов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Torrey and Whitmer, Кристаллические детекторы (монография), Mc Graw Hill (1948).
2. Lark-Horovitz, Electrical Engineering **68**, 1047 (1949).
3. Mott, P. I. E. E. **96**, I, 253 (1949).
4. М. Арденнс, Физические основы применения радиоактивных и стабильных изотопов в качестве индикаторов, ГИИЛ, Москва (1948).
5. «Получение и определение меченных атомов», Сборник статей, ГИИЛ, Москва (1948).
6. Lark-Horovitz, NDRC Report 14-585 (март 1942 — ноябрь 1945).
7. Гудмен, Научные и технические основы ядерной энергетики, ГИИЛ, 1949.
8. Johnson and Lark-Horovitz, Phys. Rev. **76**, 442 (1949).
9. Shockley, Bell System Techn. Journal, **23**, 435 (1949).