

О МЕХАНИЗМЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРИМЕСНОГО ПРОБОЯ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В АМОРФНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А. Г. Забродский, С. М. Рывкин, И. С. Шлимак

До последнего времени нет однозначного решения вопроса об электронном механизме переключения в аморфных полупроводниках. С другой стороны, эффект переключения фактически наблюдается и в кристаллических полупроводниках: как известно, низкотемпературный пробой в легированных и компенсированных полупроводниках имеет S -образную вольт-амперную характеристику¹⁾. Объяснение этого эффекта основано на том, что пробой обусловлен ударной ионизацией мелких примесей [1], причем после начала пробоя электроны перераспределяются на еще более мелкий уровень, ионизация с которого вероятнее, в результате чего напряжение поддержания пробоя меньше напряжения зажигания E_3 . В качестве такого уровня предлагалось, в частности, первое возбужденное состояние мелкого примесного центра [2].

Ниже будет показано, что между явлениями переключения в кристаллических и аморфных полупроводниках существует аналогия. Экспери-

¹⁾ Пробой с S -образной характеристикой мы будем называть в дальнейшем переключением, поскольку в этом случае одному значению напряжения может соответствовать два различных значения тока.

менты проводились нами на образцах сильно легированного и компенсированного (СЛК) германия. Помимо самостоятельного интереса (до сих пор переключение в СЛК полупроводниках не исследовалось), следовало ожидать, что механизм переключения в этих образцах окажется общим и для ряда аморфных структур благодаря сходству спектров электронных состояний в этих системах [3].

$j, \text{a/cm}^2$

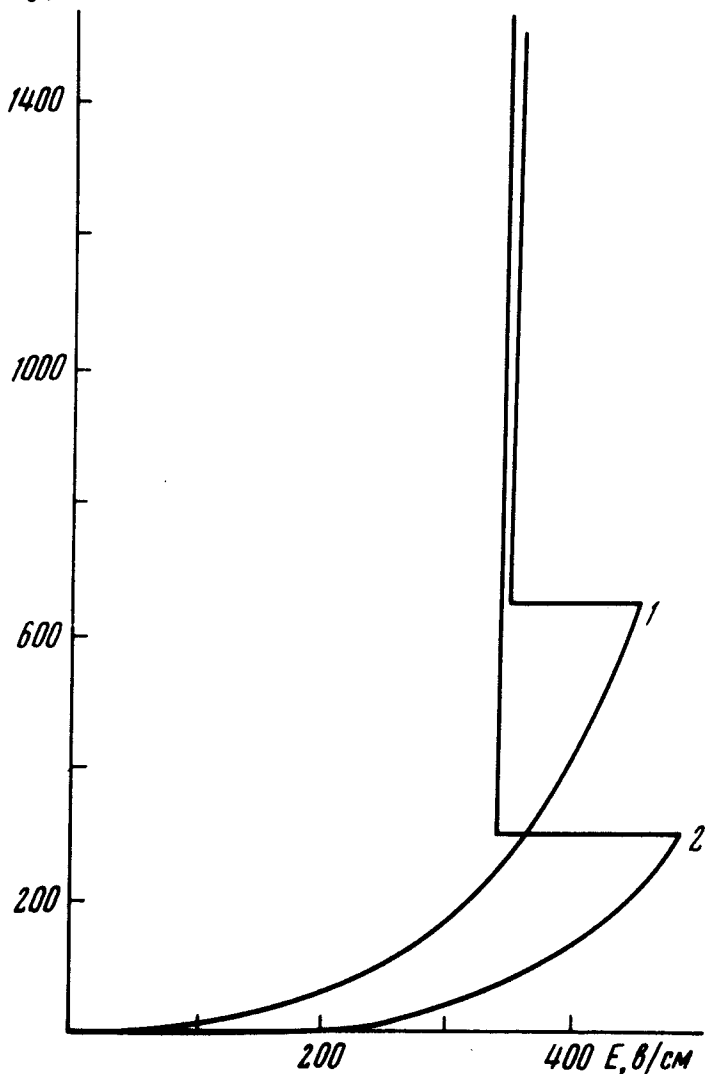


Рис. 1. ВАХ одного из образцов СЛК германия: 1 - 4,2°K, 2 - 2,2°K

На первый взгляд, механизм ударной рекомбинации в СЛК и аморфных полупроводниках должен требовать слишком больших полей из-за глубокого положения уровня Ферми. Так, оценки сделанные в [4], показывают что для уровней глубиной 0,1 - 0,2 эв поле должно быть порядка $10^5 - 10^6 \text{ в/см}$. Однако в слабо легированных кристаллических полупроводниках, когда мелкие примеси полностью скомпенсированы глубокими и ударная ионизация не наблюдается, ее все же можно осуществить, если заполнить (например, с помощью освещения) мелкие примес-

ные центры. Этот эффект впервые описан в [5] и известен как индуцированный примесный пробой. Мы покажем, что аналогичное явление может иметь место в СЛК и аморфных полупроводниках. Действительно, при низких температурах носители в этих полупроводниках локализованы в наиболее глубоких ямах потенциального рельефа, и перенос заряда осуществляется с помощью туннельных прыжков носителей из одной ямы в другую, причем состояния по которым происходят прыжки, находятся в узкой полосе энергий Δ вблизи уровня Ферми. Ямы меньшей глубины, которые образуют статистически непрерывный энергетический спектр состояний над уровнем Ферми, остаются в слабом электрическом поле пустыми. Однако в достаточно сильном поле, когда перепад потенциальной энергии электрона на длине прыжка eER станет превышать величину Δ , эти состояния начнут эффективно заполняться, и при достижении на относительно мелких уровнях некоторой критической концентрации носителей n_0 , станет возможным развитие с этих уровней ударной ионизации. Такой процесс аналогичен индуцированному примесному пробое с тем отличием, что заполнение верхних уровней осуществляется не светом, а с помощью самого электрического поля. Следствиями предложенной модели должны являться некоторые характерные особенности переключения. Так, в области низких температур E_3 должно слабо зависеть от температуры. Время задержки переключения τ_3 будет определяться временем τ_0 , необходимым для достижения концентрации n_0 , и должно поэтому существенно превышать характерное время прыжка τ_h .

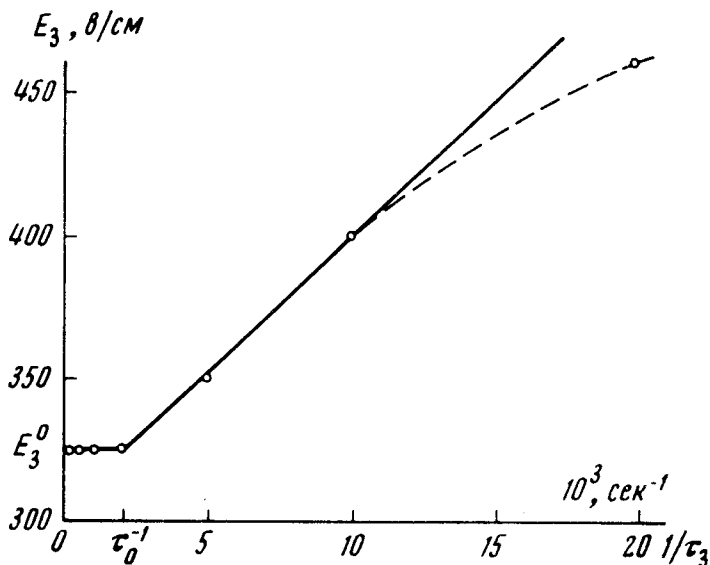


Рис. 2. Зависимость E_3 от τ_3 для одного из образцов

Эксперименты, проведенные на группе образцов СЛК Ge с полной концентрацией примесей $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и разной степенью компенсации подтвердили эти предположения. Величина E_3 для всех исследованных образцов в интервале 1,4 – 4,2°K слабо уменьшалась с ростом температуры (рис. 1). Импульсные измерения позволили определить τ_0 как минимальное время, при котором E_3 не отличается от своего значения E_3^0 на постоянном токе (рис. 2). Для образцов с различной

степенью компенсации величина τ_0 менялась, коррелируя с изменением τ_h , так что для всех образцов отношение τ_0/τ_h было порядка 10.

При $\tau < \tau_0$ за время импульса на мелких уровнях не успевает "накопиться" концентрация n_0 , так что пробой может осуществиться лишь при более высоком напряжении $E_3 > E_3^0$. Поскольку перепад потенциальной энергии на длине прыжка растет линейно с полем, то следует ожидать, что при малых отклонениях от E_3^0 увеличение E_3 должно быть пропорционально уменьшению τ_3 , т. е. $E_3 \sim 1/\tau_3$. По этой же причине E_3^0 должно линейно расти с увеличением глубины уровня Ферми. Из рис. 2 и 3 видно, что обе эти зависимости экспериментально хорошо выполняются.

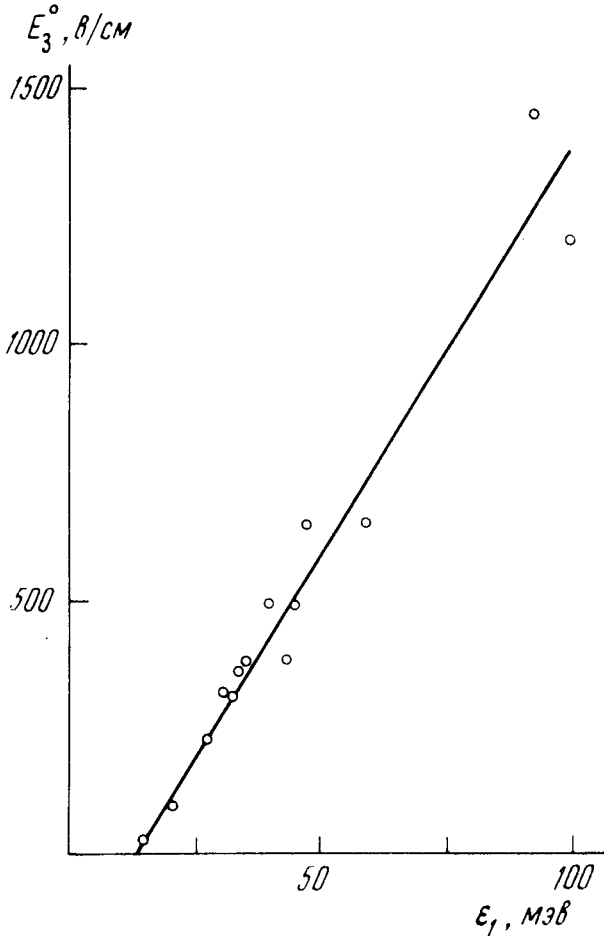


Рис. 3. Зависимость E_3^0 от глубины уровня Ферми, $T = 1,4^\circ\text{K}$

Итак, ударная ионизация происходит с группы относительно мелких уровней. Однако, внутри этой группы можно выделить мелкие состояния, для которых наиболее велика вероятность ударной ионизации. Таких состояний статистически больше всего и поэтому "вымораживание" свободных носителей после начала пробоя происходит преимущественно на них. Если время жизни носителей относительно их дальнейшей релаксации в более глубокие состояния будет больше, чем время, необходимое для развития ударной ионизации, то ионизация в дальнейшем будет идти уже с самых мелких уровней, что облегчит условие поддер-

жания пробоя и обеспечит S-образный характер ВАХ т. е. эффект переключения. С повышением температуры, когда релаксация носителей из мелких в более глубокие ямы убыстрятся благодаря надбарьерным переходам, S-образность должна уменьшаться. Температурные исследования показали, что в образцах СЛК Ge S-образность начинает резко уменьшаться при $T > 5^\circ\text{K}$ и при $T = 25^\circ\text{K}$ исчезает совсем. Это позволяет оценить эффективную глубину наиболее мелких состояний, перезаполнение которых ответственно за переключение, в несколько миллиэлектронвольт.

В слабо легированных полупроводниках наличие компенсирующей примеси приводит к тому, что уровни некоторых ионов основной примеси оказываются значительно приподнятыми относительно уровней нейтральных атомов. После пробоя на уровни этих ионов будет происходить "вымораживание" электронов из зоны проводимости, что должно также способствовать эффекту переключения. Особенно заметным это явление может быть при наличии корреляции в расположении ионов основной и компенсирующей примеси, когда энергия кулоновского взаимодействия примесей существенно больше, чем на среднем расстоянии.

Поступила в редакцию
27 августа 1973 г.

Литература

- [1] Э.И.Заварицкая. ФТП, 5, 3545, 1964; А.К.Пустовойт. ФТП, 5, 1760, 1971 .
 - [2] А. А. Kastalskii . Phys. Stat. Sol. (a), 15, 599, 1973.
 - [3] Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос. ЖЭТФ, 62, 1156, 1972; S. M. Ryvkin, I. S. Shlimak. Phys. Stat. Sol (a), 16, 515, 1973.
 - [4] Б.Т.Коломиец, Э.А.Лебедев, Э.А.Сморгонская. ФТП, 6, 2073, 1972,
 - [5] S. M. Ryvkin, V. P. Dobrego, B. M. Konovalenko, I. D. Yaroshetsky. Proc. Int. Conf. Phys. Semic., Exeter, 1962, p. 121.
-