

АКУСТОЭМИССИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Калитенко В. А., Кучеров И. Я., Перга В. М.

Исследована акустическая эмиссия (АЭ) в монокристаллах Si и CdS при протекании электрического тока. Обнаружено, что при приложении к образцам Si и CdS электрического поля и протекании тока определенной величины возникают сигналы АЭ, носящие импульсный характер. АЭ в Si возникает при напряженностях электрического поля $\sim 50 \div 80$ В/см, в CdS — $\sim 600 \div 700$ В/см. Образцы Si при этом существенно нагреваются. После отключения источника тока АЭ в образцах CdS прекращается мгновенно, а у большинства образцов Si наблюдается остаточная АЭ, которая медленно уменьшается со временем. В этих же образцах Si АЭ наблюдается и при их нагревании от постороннего источника тепла. Предполагается, что АЭ в монокристаллах Si и CdS при протекании электрического тока обусловлена срывом и движением заряженных дислокаций под действием электрического напряжения. В Si дополнительной причиной срыва и движения дислокаций могут быть и термоупругие напряжения.

Полупроводниковые приборы при прохождении через них электрического тока испускают акустический шум (акустоэмиссия) [1]. Поскольку акустоэмиссия (АЭ) полупроводниковых приборов в результате акустоэлектрического преобразования может стать одним из источников низкочастотного токового шума этих приборов [2], изучение ее природы представляется весьма важным. Источником АЭ полупроводниковых приборов могут быть различные области: контакты, $p-n$ -переходы, полупроводник. Настоящая работа посвящена исследованию однородных полупроводников при пропускании через них электрического тока.

Схема эксперимента показана на рис. 1. К омическим контактам 1 исследуемого образца 2 прикладывалось постоянное электрическое напряжение, создающее электрический ток через образец. К образцу через кварцевый звукопровод 3 присоединялся пьезоэлектрический преобразователь 4 с резонансной частотой 265 кГц для регистрации сигналов АЭ, которые затем усиливались и обрабатывались измерителем акустических сигналов 5, наблюдались на осциллографе 6 и записывались на ленте самопишущего прибора 7. Приборы 9 и 10 измеряли силу тока через образец и прикладываемое к образцу напряжение. Объектами исследования служили кристаллы кремния n - и p -типа и высокоомного фоточувствительного сульфида кадмия. Кремний выбран потому, что является базовым кристаллом полупроводниковой электроники, а CdS — как хорошо изученный фотополупроводник, проводимость которого можно легко изменять подсветкой в широких пределах и, таким образом, выяснить влияние проводимости на изучаемые эффекты. Образцы имели форму пластин площадью $1 \div 2$ см² и толщиной: Si — $250 \div 500$ мкм, CdS — $1 \div 2$ мм. Плотность дислокаций в исходных образцах Si не превышала 10^2 см⁻², а в CdS — 10^6 см⁻². Удельная проводимость кристаллов Si была $(1 \div 2) \cdot 10^{-1}$ Ом⁻¹·см⁻¹, а темновая проводимость кристаллов CdS — $10^{-6} \div 10^{-7}$ Ом⁻¹·см⁻¹. Омичность контактов проверялась по вольтамперным характеристикам. Проводимость кристаллов CdS изменялась путем освещения от лампы накаливания через тепловой фильтр и фильтр, пропускающий желто-зеленую часть спектра.

Было исследовано 30 образцов Si и 4 образца CdS. Проведенные исследования показали, что у большинства образцов Si и у всех образцов CdS при прило-

жении к ним постоянного электрического напряжения определенного значения и протекании электрического тока датчиком 4 регистрировались импульсы АЭ порядка $7 \div 20$ мкВ.

Образцы Si в режиме возникновения АЭ существенно нагреваются. При повторном включении напряжения (U) через небольшой промежуток времени ($t \approx 1$ мин) после отключения АЭ появлялась при U , несколько большем, а именно соответствующем напряжению, на котором был прекращен предыдущий опыт, т. е. имеет место эффект, подобный эффекту Кайзера, характерному для АЭ при механическом воздействии [3]. При длительном испытании образцов в режиме возникновения акустических шумов частота следования сигналов АЭ уменьшается и они со временем практически полностью исчезают. Так как в режиме, соответствующем

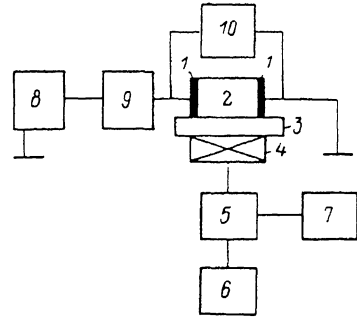


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — омические контакты, 2 — образец, 3 — кварцевый звукопровод, 4 — пьезоэлектрический преобразователь АЭ, 5 — измеритель акустических сигналов, 6 — осциллограф, 7 — прибор самописца, 8 — источник постоянного напряжения, 9 — миллиамперметр, 10 — вольтметр.

возникновению сигналов АЭ, образцы существенно нагревались, были проведены опыты по обнаружению АЭ в этих же образцах Si при их нагревании от постороннего источника тепла. Оказалось, что нагрев образцов Si от постороннего источника тепла в ряде случаев также приводит к появлению сигналов АЭ.

В связи с этим для исследования АЭ в Si были подготовлены две группы образцов. В одной группе (1) вначале исследовалась АЭ при приложении электрического напряжения, а затем — при их нагреве посторонним источником тепла, во второй группе (2), наоборот, — вначале при нагреве посторонним ис-

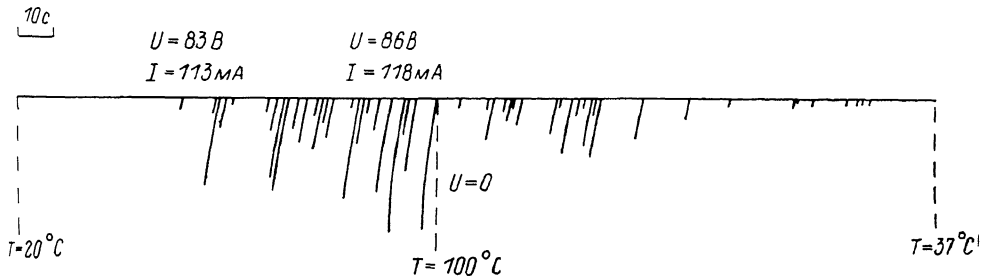


Рис. 2. Распределение импульсов АЭ, возникающих в кристаллах Si при протекании электрического тока через образец и после его отключения, во времени.

точником тепла, а затем при приложении электрического напряжения. Время одного измерения сигналов АЭ составляло примерно 2—3 мин, после чего от образца отключался источник электрического напряжения или тепла.

Эти исследования показали, что в группе 1 при приложении U определенной величины в 10 образцах из 11 наблюдалась АЭ. Величина напряженности электрического поля в образцах при этом была порядка $50 \div 80$ В/см, электрического тока $60 \div 120$ мА, они нагревались до температуры $60 \div 100$ °C. После отключения напряжения у одних образцов АЭ исчезала сразу же, а у других наблюдалась еще некоторое время, постепенно затухая. В качестве примера на рис. 2 показано распределение импульсов АЭ во времени, воспроизведенное с ленты самописца, при протекании тока через образец и после его отключения. При нагреве этих образцов посторонним источником тепла в трех из них наблюдалась АЭ. Наблюдалась она у тех образцов, у которых в предыдущем опыте после отключения напряжения АЭ исчезала не сразу. При этом температура, при которой появлялась АЭ, примерно в 1.5 раза выше, чем в случае

приложения U . После отсоединения нагревателя АЭ исчезала не сразу, а медленно со временем уменьшалась.

В группе 2 при нагреве от постороннего источника наблюдалась АЭ в 6 образцах из 10 при температуре образцов примерно $90 \div 110$ °С. У этих образцов имел место эффект, подобный эффекту Кайзера. У остальных образцов АЭ не наблюдалась при нагреве их до температуры ~ 200 °С. При приложении U АЭ наблюдалась в 9 образцах. Температура образцов, при которой появлялась АЭ, в этом случае была примерно на $15 \div 30$ °С ниже, чем при их нагревании от постороннего источника тепла. После отключения напряжения АЭ исчезала сразу.

В монокристаллах CdS при приложении электрического напряжения вдоль оси C_6 АЭ возникала, как уже отмечалось, во всех образцах. При темновой проводимости АЭ возникала, начиная с прикладываемых электрических полей напряженностью порядка $600 \div 700$ В/см, при этом ток через образец был $1 \div 2$ мА (в образце рассеивалась электрическая мощность порядка 0.5 Вт/см²). Образец практически не нагревался. После отключения напряжения АЭ



Рис. 3. Изменение интенсивности АЭ, возникающей в монокристаллах CdS при длительном воздействии на образец постоянного напряжения.

$$U=270 \text{ В}, I=2.3 \text{ мА.}$$

сразу же прекращалась. При повторном включении напряжения через $t \approx 1$ мин в отличие от кристаллов Si АЭ возникала при несколько меньшем напряжении. Так, для одного из образцов CdS первое измерение порога АЭ $U=434$ В, второе — $U=400$ В, третье — $U=380$ В. Каждый раз образец выдерживался под напряжением одно и то же время, равное примерно 20 с. При длительном выдерживании образца под напряжением, так же как и в образцах Si, интенсивность АЭ со временем уменьшается и в конце концов полностью исчезает. На рис. 3 в качестве примера показано изменение АЭ со временем в одном из образцов CdS при $U=270$ В, $I=2.3$ мА. Увеличение проводимости CdS подсветкой несколько уменьшает поле порога АЭ. При нагревании CdS посторонним источником тепла до температуры примерно 110 °С АЭ не наблюдалась.

Необходимо заметить, что одним из источников сигналов АЭ в монокристаллах CdS могут быть усиленные тепловые шумы [4]. Однако напряженность электрического поля, при которой возникают эти шумы, существенно выше, чем напряженность поля, при которой возникает акустический шум, описанный выше.

Возникновение АЭ в CdS и Si при приложении электрического напряжения можно объяснить срывом и движением заряженных дислокаций. Известно [5, 6], что в CdS и Si могут существовать заряженные дислокации в результате образования оборванных ненасыщенных связей в ядре дислокации. Эти связи в результате обмена электронами с решеткой становятся заряженными. Авторам работы [5] также показано, что в результате освещения кристаллов группы $A^{IV}V^{VI}$ заряд дислокаций растет. Возникновение АЭ при некоторых пороговых электрических полях в кристаллах CdS можно связать с воздействием на заряженные дислокации внешнего электрического поля, в результате чего возникает упругое напряжение, равное стартовому напряжению движения дислокации. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что в CdS после отключения внешнего электрического напряжения АЭ сразу же полностью исчезает. Уменьшение порогового напряжения возникновения АЭ при увеличении подсветки можно объяснить увеличением заряда дислокаций [5].

В кристаллах Si в режиме возникновения АЭ при протекании электрического тока образцы существенно нагреваются, а после отключения внешнего напряжения АЭ исчезает не полностью, и имеет место эффект, подобный эффекту Кайзера. Кроме того, АЭ наблюдается и при нагреве от постороннего источника тепла. Поэтому АЭ в Si может быть обусловлена срывом и движением дислокаций под действием одновременно электрического поля и термоупругих напряжений. АЭ в Si при протекании электрического тока нельзя объяснить только возникновением термоупругих напряжений, так как в этом случае АЭ появляется при температуре образца, существенно меньшей, чем при нагреве от постороннего источника тепла.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что одним из источников АЭ в полупроводниковых кристаллах при протекании электрического тока может быть перемещение заряженных дислокаций. Движение заряженных дислокаций должно приводить к возникновению флуктуаций электрического тока, что может служить одной из причин появления низкочастотного токового шума полупроводников.

Л и т е р а т у р а

- [1] Калитенко В. А., Кучеров И. Я., Перга В. М. — Изв. вузов СССР, Радиоэлектрон., 1984, т. 27, в. 10, с. 91—92.
- [2] Калитенко В. А., Кучеров И. Я., Перга В. М. — УФЖ, 1986, т. 31, в. 8, с. 2006—2008.
- [3] Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. М., 1976. 272 с.
- [4] Калашников С. Г., Морозов А. И., Проклов В. В. — Препринт ИРЭ АН СССР, ч. II. М., 1969. 46 с.
- [5] Осибян Ю. А., Петренко В. Ф. — В кн.: Физика соединений $A^{IV}B^{VI}$. М., 1986, с. 35—71.
- [6] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 475 с.

Киевский государственный университет
им. Т. Г. Шевченко

Получена 5.01.1987
Принята к печати 21.07.1987