

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Бродовой В. А., Воскобойников А. М.,
Лысенко А. Е., Нелуп В. А.

Обнаружена и исследована акустическая эмиссия (АЭ), возникающая в транзисторах, работающих в импульсных режимах и температурах, близких к комнатным. Установлено, что АЭ наблюдается только в момент нарастания или спадания входного импульса прямой полярности, инжектирующего в базу неосновные носители заряда. Зависимости интенсивности АЭ от $V_{кб}$ и J_b близки линейным в области малых величин $V_{кб}$, J_b и стремятся к насыщению с ростом тока базы и напряжения коллектор—эмиттер. Анализ экспериментальных результатов и численные оценки показали, что из двух возможных механизмов АЭ (термомеханического и полевого) предпочтение следует отдать полемому.

Акустическая эмиссия (АЭ) является одним из потенциально перспективных способов диагностического контроля изделий полупроводниковой техники. Однако широкое применение АЭ метода в полупроводниковой электронике сдерживается недостаточной изученностью возможных источников АЭ в полупроводниковых структурах. В связи с этим представляют интерес исследования причин появления АЭ в полупроводниковых устройствах при различных режимах их работы. Так, в [1, 2] АЭ в диодах и транзисторах связывается с возникновением областей перенапряженного состояния в результате локального перегрева структур проходящим током.

В настоящей работе обнаружена и исследована АЭ, возникающая в транзисторах, работающих в импульсных режимах и температурах, близких к комнатным.

Исследования выполнены на кремниевых и германиевых $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторах малой и большой мощности, низкой и средней частоты, таких как КТ801А, П214А, МП26А и др. В работе приведены данные исследований транзисторов КТ801А. Для других типов приборов результаты были аналогичными. Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 1, а. Находящиеся в корпусе транзисторы (7) приводились в акустический контакт с пьезоэлектрическим преобразователем (1), изготовленным из пьезокерамики ЦТС-19 с резонансной частотой 265 кГц. Использовалась схема включения с общим эмиттером. От источника питания ВСП-3 (8) подавалось постоянное смещение, определяющее режим работы транзистора. Сигналы АЭ генерировались при подаче на базу транзистора одиночных прямоугольных импульсов напряжения от генератора Г5-60 (6). Длительность импульсов менялась в пределах от 0.5 до 10 мс. Длительность фронта была менее 0.1 мкс. После предварительного усиления (2) сигналы АЭ поступали на вход измерителя акустических сигналов ИАС-4 (3) и регистрировались самописцем НЗ38 (4) или осциллографом С8-13 (5).

Отметим, что при постоянных токах, соответствующих оптимальным эксплуатационным условиям работы транзисторов, АЭ не наблюдалась. При разогреве приборов проходящим током возникала АЭ, подробно исследованная в [1].

В импульсном режиме питания транзистора генерировались сигналы АЭ, обладающие следующими характерными особенностями. Эмиссия возникала только в момент нарастания или спадания импульса напряжения прямой полярности, инжектирующего в базу неосновные носители.

На рис. 2, а показаны формы сигналов АЭ (1) и входного напряжения (2). Наблюдаемое запаздывание АЭ относительно импульса напряжения ($\Delta t = 16$ мкс) обусловлено наличием между пьезопреобразователем и источником АЭ транзистором алюминиевой прокладки толщиной $d=5$ см. Полученная из этих измерений скорость звука в алюминии, равная $3.1 \cdot 10^5$ см/с, близка к табличному значению.

На рис. 3, б показана зависимость отношения максимальных амплитуд сигнала A_c и шума $A_{ш}$, $A_c/A_{ш}$ от длительности переднего (или заднего) фронта инжектирующего импульса τ_{ϕ} при постоянных значениях $V_{кэ}$ и J_0 . Из графика

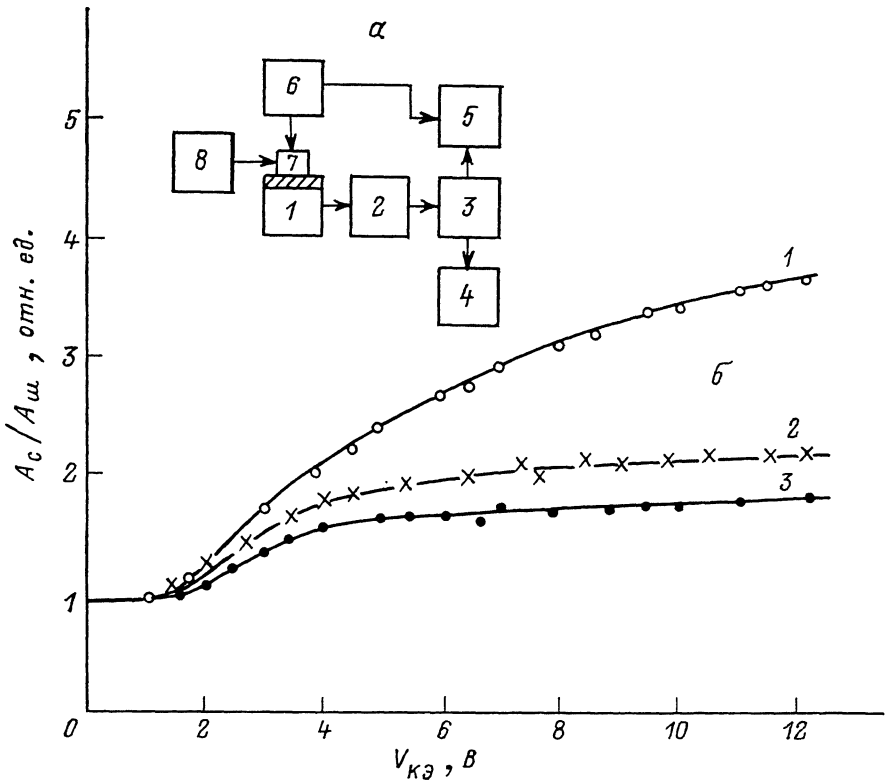


Рис. 1.

а) блок-схема установки для наблюдения АЭ: 1 — пьезодатчик, 2 — предусилитель, 3 — ИАС-4, 4 — микрофон Н338, 5 — осциллограф С8-13, 6 — импульсный генератор Г5-60, 7 — исследуемый транзистор, 8 — источник питания ВСП-30; б) зависимость $A_c/A_{ш}$ от напряжения коллектор—эмиттер; J_0 , А: 1 — $4.5 \cdot 10^{-2}$, 2 — $2.7 \cdot 10^{-2}$, 3 — $1.8 \cdot 10^{-2}$.

видно, что для генерации акустосигналов инжекция должна носить резкий, ударный характер. При длительности фронта $\tau_{\phi} \sim 80-100$ мкс сигналы АЭ не различаются на уровне шума. Типичные зависимости $A_c/A_{ш}(J_0)_{V_{кэ}=\text{const}}$ и $A_c/A_{ш}(V_{кэ})_{J_0=\text{const}}$ приведены на рис. 1, б; 2, б. Характерной особенностью этих кривых является относительно медленный рост интенсивности АЭ при малых значениях J_0 или $V_{кэ}$, переходящий в насыщение с увеличением тока базы или напряжения коллектор—эмиттер. В условиях инверсного включения и тех же значениях J_0 и $V_{кэ}$ интенсивность АЭ была слабой, что указывает на важность для наблюдения АЭ определенных уровней инжекции.

Генерацию импульсов АЭ можно связать как с термомеханическими эффектами при прохождении через коллекторный переход импульсов тока [3], так и с деформациями $p-n$ -перехода под действием приложенного к нему электрического поля.

Тот факт, что форма, частота и амплитуда акустических сигналов совпадают в начале и конце инжектирующих импульсов тока, а также насыщение кривых $A_c/A_{ш}(J_0)$, $A_c/A_{ш}(V_{кэ})$ свидетельствуют в пользу второго, полевого, меха-

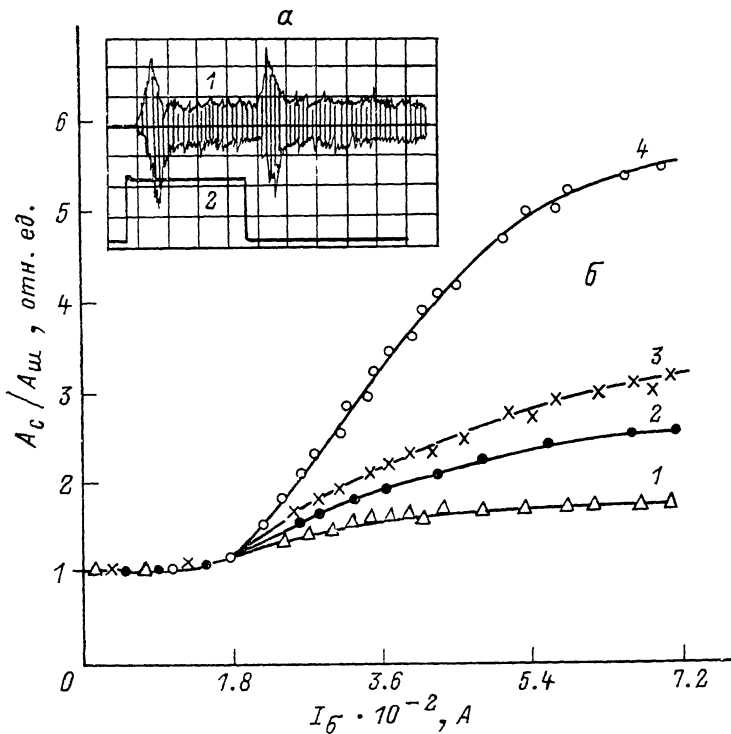


Рис. 2.

а) формы сигналов АЭ (1) и входного напряжения (2), масштаб: по вертикали — 2В/дел, по горизонтали — 100 мкс/дел; б) зависимость $A_c/A_{ш}$ от тока базы; $V_{кз}$, В: 1 — 3.4, 2 — 4.2, 3 — 5.6, 4 — 9.7.

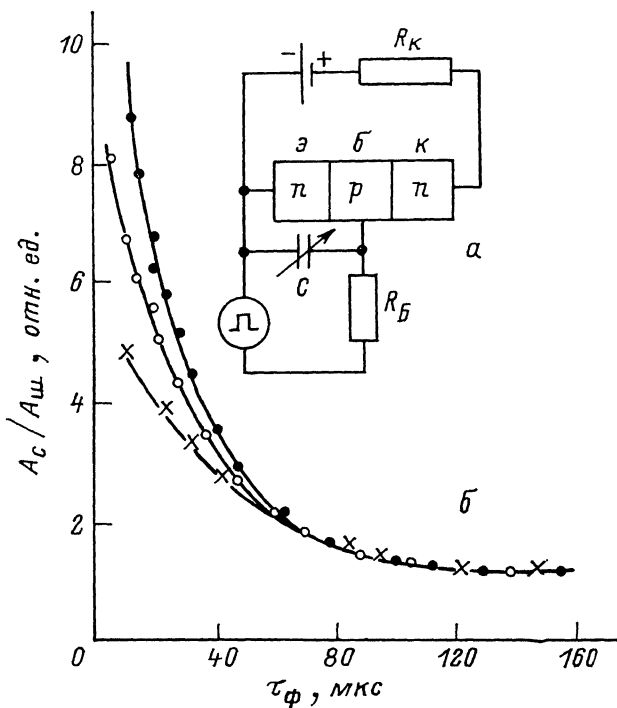


Рис. 3.

а) схема включения транзистора при измерении $A_c/A_{ш}$ от фронта входного импульса $\tau_ф$; б) зависимость $A_c/A_{ш}$ от $\tau_ф$; $J_б$, А: крестики — $1.8 \cdot 10^{-2}$, кружки — $3.6 \cdot 10^{-2}$, точки — $4.5 \cdot 10^{-2}$.

низма генерации. Можно показать, что в случае электрического взаимодействия давление P в ОПЗ $p-n$ -перехода равно

$$P = q\bar{N}(V_k + V), \quad (1)$$

где $\bar{N} = N_a^+ N_a^- / (N_a^+ + N_a^-)$, $N_a^+ N_a^-$ — концентрации ионизированных доноров и акцепторов в n - и p -областях, V_k — контактная разность потенциалов, V — напряжение обратного смещения на $p-n$ -переходе. Для типичных значений $N_a^+ = N_a^- = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $(V_k + V) = 20 \text{ В}$, согласно (1), величины $P = 4.8 \cdot 10^3 \text{ н/м}^2$. Отметим, что максимальное давление, при котором происходит разрушение кремния, гораздо больше и равно $P_{\text{max}} = 10^5 \text{ н/см}^2$ [3]. Однако, как следует из динамического ударного характера АЭ (рис. 3, б), величина акустических сигналов зависит не только от абсолютных значений давления, но в значительной степени от скорости его изменения. В свою очередь и изменение давления P может быть связано с изменением плотности объемного заряда при прохождении инжектированных носителей через коллекторный $p-n$ -переход.

Оценки, однако, показывают, что для ВЧ и СВЧ кремниевых транзисторов критические токи коллектора, при которых можно ожидать заметного изменения плотности объемного заряда, лежат в пределах 32–20 А [4]. Эти величины более чем на порядок превышают значения токов коллектора $J_k = 1.38 - 0.54 \text{ А}$, при которых в нашем случае экспериментально наблюдается АЭ.

Возможен другой механизм генерации акустосигналов, связанный с тем, что с ростом тока J_k увеличивается падение напряжения на сопротивлении квазинейтральной области коллектора R_k или на сопротивлении нагрузки R_n , включенной в цепь коллектора, и соответственно убывает напряжение на $p-n$ -переходе. В этом случае заметное изменение давления P может быть достигнуто при гораздо меньших значениях токов J_k , сравнимых с приведенными выше величинами. Так, например, для $(R_k + R_n) = 10^3 \text{ Ом}$ и минимального значения тока $J_k = 0.54 \text{ А}$ ($(R_k + R_n) J_k > (V_k + V)$). При этих условиях транзистор за время импульса тока переходит в режим насыщения, а перепад напряжений на $p-n$ -переходе ΔV_{p-n} при заданном $V_{кз}$ достигает наибольшей величины $\Delta V_{p-n} = V_{кз}$. С ростом J_k , а следовательно, и J_k и ΔV_{p-n} связанное с ним изменение давления практически остается неизменным, что приводит к насыщению кривой $A_0/A_m (J_k)_{V_{кз} = \text{const}}$.

Переход к насыщению на зависимостях $A_0/A_m (V_{кз})_{J_k = \text{const}}$ обусловлен теми же причинами. Так, несмотря на рост $V_{кз}$, величина ΔV_{p-n} при подаче на вход транзистора одинаковых по амплитуде и длительности импульсов тока будет оставаться постоянной, что в свою очередь приведет к постоянству P , а следовательно, и к интенсивности акустоэмиссии.

Список литературы

- [1] Калитенко В. А., Кучеров И. Я., Перга В. М. // Изв. вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. 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. 1266–1268.
- [3] Отблеск А. Е., Челноков В. Е. Физические проблемы в силовой полупроводниковой электронике. Л., 1984. 215 с.
- [4] Кремниевые планарные транзисторы / Под ред. Я. А. Федотова. М., 1973. 335 с.

Киевский государственный университет
им. Т. Г. Шевченко

Получена 28.06.1989
Принята к печати 28.11.1990