

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОКА В КРЕМНИИ, КОМПЕНСИРОВАННОМ МАРГАНЦЕМ, СВЯЗАННАЯ С РЕКОМБИНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

Бахадырханов М. К., Парманкулов И. П.

Изучены особенности неустойчивостей тока, обнаруженных в кристаллах кремния, компенсированного марганцем, с  $\rho = 10^3 \div 10^5$  Ом·см. Колебания тока возбуждались в темноте в интервале температур 250–350 К, когда электрическое поле, прикладываемое к образцу, превышало некоторое пороговое значение  $E_H$ . С ростом температуры величина  $E_H$  снижается в пределах 210–25 В/см, а частота на пороге возрастает в интервале  $10^2 \div 1.8 \cdot 10^4$  Гц.

Установлено, что параметры колебаний тока сильно зависят от условий их возбуждения. С повышением температуры и электрического поля амплитуда возрастает в пределах  $10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-4}$  А, частота колебаний с ростом температуры экспоненциально возрастает, а с ростом поля несколько снижается, и при относительно высоких полях возбуждение дополнительных гармоник приводит к повышению частоты колебаний тока.

На основе сопоставительного анализа характера изменения параметров колебаний тока от условий их возбуждения и аналогичных параметров колебаний тока, обнаруженных в других материалах, и в соответствии с расчетом параметров образцов Si <Mn> сделано предположение, что наблюдаемые колебания тока связаны с возбуждением в кристаллах медленных рекомбинационных волн.

В работе [1] были приведены результаты исследования неустойчивостей тока, возникающих в высокоомных образцах кремния, легированного марганцем, под воздействием электрического поля и света в интервале температур 77–150 К. Механизм возникновения этих низкочастотных колебаний тока связан с температурно-электрической неустойчивостью (ТЭН) [2].

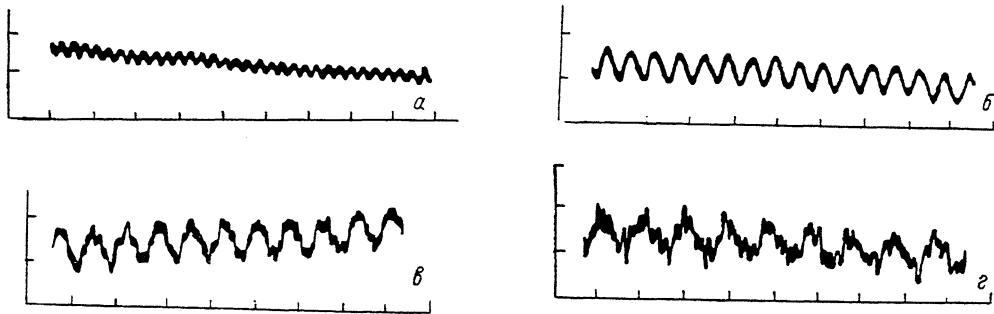


Рис. 1. Формы колебаний тока в образце Si <Mn> с  $\rho = 2 \cdot 10^5$  Ом·см  $p$ -типа при различных электрических полях.

$T = 290$  К,  $R_H = 10^4$  Ом. Размер образца  $3 \times 2 \times 2$  мм. Абсолютная величина тока —  $J_0$ ; масштаб: по оси  $y$  —  $5 \cdot 10^{-3}$  В/см, по оси  $x$  — 0.4 мс/см.  $E$ , В/см: а — 170, б — 260, в — 380, г — 425.  $J_0$ , А: а —  $2 \cdot 10^{-5}$ , б —  $3 \cdot 10^{-5}$ , в —  $5 \cdot 10^{-5}$ , г —  $6 \cdot 10^{-5}$ .

В данной работе приводятся результаты исследования неустойчивостей тока, обнаруженных в образцах кремния, компенсированного марганцем, с удельным сопротивлением  $\rho = 10^3 \div 10^5$  Ом·см, существенно отличающиеся от ТЭН по условиям возбуждения и другим параметрам.

Образцы Si <Mn> изготовлялись по технологии, описанной в работе [3]. В качестве исходного материала был использован промышленный кремний марки КДБ с  $\rho \approx 10$  Ом·см. Образцы включались в цепь последовательно с батареей

и нагрузочным сопротивлением  $R_n$ , причем  $R_n \ll R_{обр}$ , что соответствует режиму генератора напряжения. Сигнал с нагрузки  $R_n$  подавался на осциллограф типа С1-48Б и анализатор спектра типа СК4-56, с помощью которых измерялись частота и амплитуда колебаний тока.

Колебания тока в кристаллах Si(Mn) возникали в области температур выше области температурного гашения фотопроводимости в этих образцах, когда напряженность электрического поля превышала некоторое пороговое значение  $E_n$  независимо от освещения. При этом значение  $E_n$  было намного меньше, чем для ТЭН, а пороговая частота  $f_n$  достигала десятка килогерц. Форма колебаний вблизи порога была близка к синусоидальной и изменялась с изменением электрического поля или температуры (рис. 1). Форма, пороговые величины  $E_n$  и  $f_n$  слабо зависели от изменения полярности батареи. При этом установлено, что

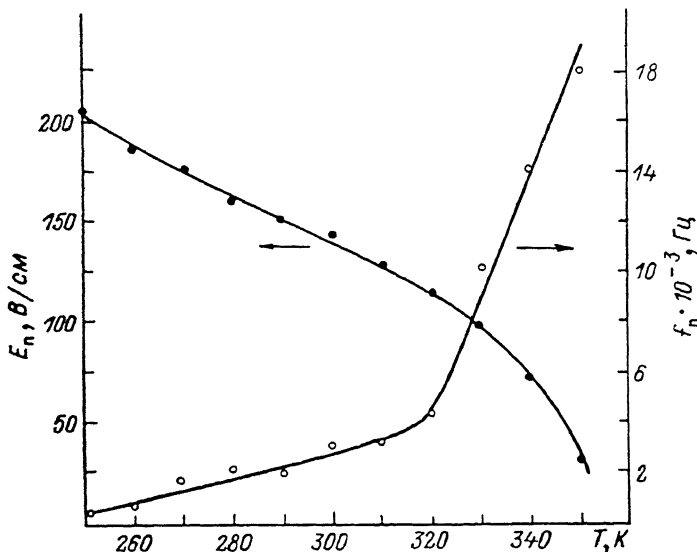


Рис. 2. Зависимости пороговых значений электрического поля  $E_n$  и частоты  $f_n$  от температуры.

различные виды обработки поверхности образца (шлифовка, полировка, травление), а также тип омического контакта существенно не влияли на основные параметры колебаний.

На рис. 2 приведены температурные зависимости  $E_n$  и  $f_n$  колебаний, возбуждающихся без освещения в одном из образцов с  $\rho = 6 \cdot 10^4$  Ом·см  $p$ -типа. Из рис. 2 видно, что наблюдаемые нами колебания существуют в достаточно широком интервале температур (от 250 до 350 К). При этом с увеличением температуры пороговое поле  $E_n$  монотонно уменьшается, тогда как пороговая частота  $f_n$  в интервале 250–320 медленно растет, а затем резко увеличивается, достигая  $2 \cdot 10^4$  Гц.

Таким образом, устойчивые колебания в наших образцах наблюдались в интервале температур 250–350 К, что значительно шире, чем области существования температур колебаний, обнаруженных в других материалах [4, 5], и выше, чем область существования ТЭН, а частота намного превышала частоту ТЭН в образцах Si(Mn) [1].

Амплитуда и частота, а также форма колебаний сильно зависят от температуры и приложенного электрического поля (рис. 1). Зависимости параметров колебаний от температуры при постоянном электрическом поле приведены на рис. 3. Как видно из рис. 3, амплитуда и частота колебаний тока растут с увеличением температуры. В исследованном интервале температур амплитуда увеличивается на 3 порядка, а частота — в 7–10 раз. Синусоидальная форма колебаний наблюдалась в узком интервале температур, затем из-за появления других гармоник форма приобретала сложный вид.

На рис. 4 приведены полевые зависимости параметров колебаний тока, снятых при постоянной температуре 306 К. Из рисунка видно, что амплитуда

колебаний  $J_k$  почти линейно возрастает с увеличением электрического поля  $E$ , тогда как зависимость частоты имеет немонотонный характер. Сначала с увели-

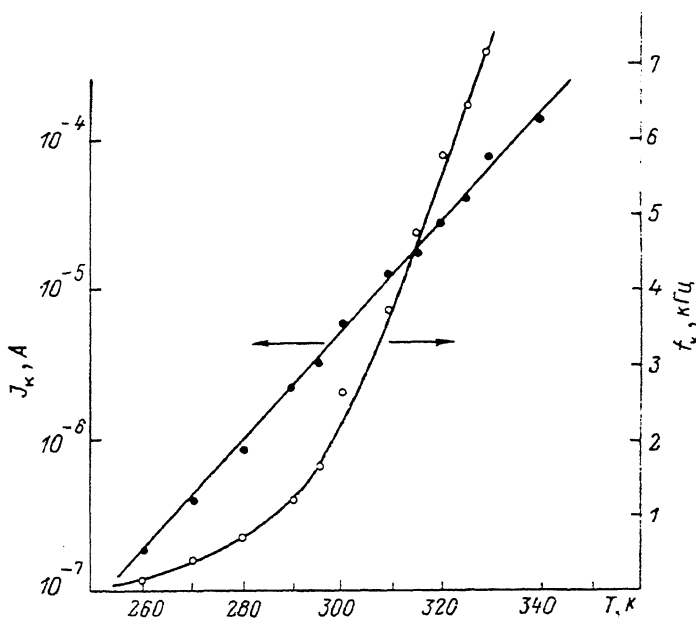


Рис. 3. Зависимости параметров колебаний — амплитуды  $J_k$  и частоты  $f_k$  от температуры при  $E=200$  В/см.

чением  $E$  частота уменьшалась в 1.5—2 раза, затем из-за появления дополнительных гармоник начала возрастать. Значение электрического поля, при кото-

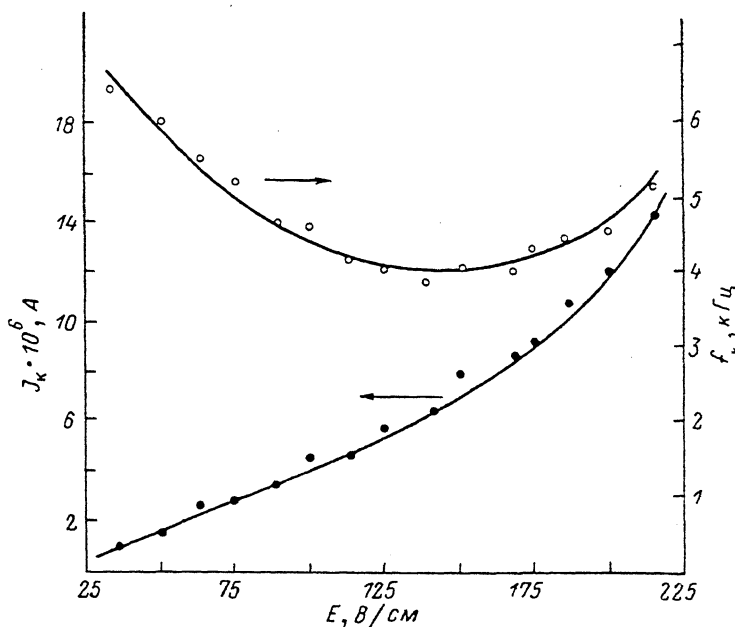


Рис. 4. Полевая зависимость параметров колебаний тока при  $T=306$  К.

ром появляются дополнительные гармоники, зависит от температуры и удельного сопротивления образцов. При исследовании полевых зависимостей параметров колебаний установление максимального значения электрического поля ограничивалось из-за трудности поддержания температуры образца неизменной.

Наблюдаемые нами колебания тока отличались от колебаний тока, описанных в работе [1], и по характеру, и по условиям возбуждения: они возбуждались при температуре, близкой к комнатной, в темноте и при относительно низких напряженностях электрического поля. При этом частота колебаний доходила до десятков килогерц, а амплитуда — до десятков микроампер.

Эти колебания по условиям возбуждения и характеру близки к колебаниям, ранее обнаруженным в ряде материалов, например в  $\text{Ge}\langle\text{Mn}\rangle$ ,  $\text{Ge}\langle\text{Au}\rangle$ ,  $\text{Si}\langle\text{Zn}\rangle$  и др. [4-6]. Возникновение этих колебаний авторы работ [4-6] объяснили существованием рекомбинационных волн (РВ) в этих кристаллах. Поэтому мы предполагаем, что описанная неустойчивость тока имеет ряд общих моментов с неустойчивостью типа медленных рекомбинационных волн, теоретически описанных в работе [7] и впервые экспериментально обнаруженных в  $\text{Si}\langle\text{Zn}\rangle$  [6]. Согласно этим работам, основными условиями возникновения медленных РВ в полупроводниках  $p$ -типа являются следующие.

а) Концентрация неосновных носителей должна быть достаточно большой, чтобы выполнялось неравенство

$$\alpha = n_0 \tau_p / p_0 \tau_n > 1, \quad (1)$$

где  $n_0$ ,  $p_0$  — стационарные концентрации электронов и дырок в зонах,  $\tau_n$  и  $\tau_p$  — времена жизни неосновных и основных носителей зарядов.

б) Дрейфовая длина неосновных носителей должна быть больше диффузионной:

$$\mu_n E > \sqrt{D_n / \tau_n}, \quad (2)$$

где  $\mu_n$  — подвижность неосновных носителей,  $E$  — напряженность электрического поля,  $D_n$  — коэффициент диффузии неосновных носителей.

Эти два критерия выполнялись в наших образцах  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$ , где генерировались колебания тока. Как известно [8], марганец, создавая в кремнии два глубоких донорных уровня ( $E_c - 0.3$  и  $E_c - 0.5$  эВ), может находиться в различных зарядовых состояниях:  $\text{Mn}^0$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $\text{Mn}^{++}$ . Центр  $\text{Mn}^{++}$  имеет асимметричные сечения захвата для электронов и дырок, т. е.  $s_n \gg s_p$ . Поэтому в зависимости от соотношения концентраций  $\text{Mn}^0$ ,  $\text{Mn}^+$ ,  $\text{Mn}^{++}$  может изменяться время жизни основных и неосновных носителей зарядов. В исследованных образцах, как показали расчеты, основная часть марганца находится в состоянии  $\text{Mn}^{++}$ , что и определяет выполнение условия  $\tau_p \gg \tau_n$ . Измеренное нами соотношение  $\tau_p / \tau_n$  по методике, описанной в работе [9], близко к  $10^2 \div 10^4$  в зависимости от  $\rho$ .

В исследованных образцах концентрации дырок и электронов в зависимости от  $\rho$  соответственно были равны  $2 \cdot 10^{11} \div 2 \cdot 10^{12}$  и  $1.3 \cdot 10^9 \div 1.3 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>. Подставляя эти значения в формулу (1), получим  $\alpha > 1$ . Для проверки выполнения критерия (2) принимаем следующие значения:  $\mu_n = 1000$  см<sup>2</sup>/В·с,  $D_n$  определяем из соотношения Эйнштейна  $\mu_n / D_n = e / kT$ , что дает  $D_n = 25.9$  см<sup>2</sup>/с, а для  $\tau_n$  принимаем значения от  $10^{-6}$  до  $10^{-7}$  с, тогда получим

$$E > \sqrt{D_n / \tau_n} / \mu_n \approx 5 \div 16 \text{ В/см},$$

что имело место в наших экспериментах.

Таким образом, автоколебания тока, генерирующиеся в кристаллах  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$  при температурах, близких к комнатным, по нашим предположениям, вызваны возбуждением в объеме кристалла медленных РВ. Экспериментальным подтверждением сказанного является некоторая идентичность температурных зависимостей  $E_n$  и  $f_n$ , приведенных на рис. 2, и таких же зависимостей для кристаллов  $\text{Si}\langle\text{Zn}\rangle$  в работе [6]. Надо отметить, что пороговое поле  $E_n$  для образцов  $\text{Si}\langle\text{Mn}\rangle$  имеет более слабую зависимость от температуры, чем для образцов  $\text{Si}\langle\text{Zn}\rangle$  [6].

#### Список литературы

- [1] Бахадырханов М. К., Зикриллаев Н. Ф. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 12. С. 2220—2222.
- [2] Калашников С. Г., Падо Г. С., Пустовойт В. И., Токарев Е. Ф. // ФТП. 1969. Т. 3. В. 7. С. 1029—1035.

- [3] Бахадырханов М. К., Болтакс Б. И., Куликов Г. С. // ФТТ. 1972. Т. 14. В. 6. С.1674—1676.
- [4] Карпова И. В., Калашников С. Г. // Письма ЖЭТФ. 1967. Т. 6. В. 11. С. 954—956.
- [5] Карпова И. В., Сыроегин С. Н. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 9. С. 1601—1605.
- [6] Завадский Ю. И., Корнилов Б. В. // ФТТ. 1969. Т. 11. В. 6. С. 1494—1504.
- [7] Константинов О. В., Перель В. И. // ФТТ. 1964. Т. 6. В. 11. С. 3364—3371. Константинов О. В., Перель В. И., Царенков Г. В. // ФТТ. 1967. Т. 9. В. 6. С. 1761—1770.
- [8] Бахадырханов М. К., Зайнабдинов С., Камиллов Т. С., Тешабаев А. Т. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 12. С. 2263—2265.
- [9] Городецкий С. М., Литовский М. А. // Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1987. № 1184.

Ташкентский политехнический институт  
им. Беруни

Получена 14.04.1989  
Принята к печати 15.05.1989