

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТОКА В КОМПЕНСИРОВАННОМ ЦИНКОМ КРЕМНИИ

М. К. Бахадырханов, Н. Ф. Зикриллаев, Э. У. Арзикулов

Ташкентский политехнический институт им. Беруни, Ташкент, Узбекистан
(Получена 12.05.1991. Принята к печати 15.01.1992)

Приведены результаты исследования осцилляции фототока в компенсированном цинком кремнии. Установлено, что регулярные и стабильные колебания тока наблюдаются в образцах n -Si(Zn) с $20 \leq \rho \leq 10^5$ и в p -Si(Zn) с $5 \cdot 10^4$ Ом·см при $T = 77 - 20$ К. Максимальное значение амплитуды доходит до $I = 400$ мА, а частота меняется в интервале $f = 10^{-3} \div 10$ Гц. Показано, что колебания тока в образцах Si(Zn) связаны с температурно-электрической неустойчивостью тока (ТЭН), которая хорошо исследована в полупроводниковых соединениях $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{III}B^{V}$. Механизм исследуемых колебаний объясняется существующей моделью ТЭН с учетом особенности поведения атомов цинка в кремнии.

В настоящее время много работ посвящено исследованию различных видов неустойчивости тока в компенсированном кремнии [1-11]. По характеру и условию возбуждения наблюдаемые эффекты можно разделить на два типа: 1) неустойчивость тока с частотой $1 - 10^6$ Гц, существующая в температурном интервале $150 - 350$ К и возбуждающаяся на участке ВАХ с положительной дифференциальной проводимостью (ПДП) [1-9]; 2) неустойчивость тока с частотой $10^{-3} - 10$ Гц, существующая в температурном интервале $77 - 150$ К и возбуждающаяся на участке ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) [10-13]. Как известно, ответственными за возникновение неустойчивостей тока обоих типов являются многозарядные глубокие центры (ГЦ) с асимметричными сечениями захвата носителей тока. Действительно, в компенсированном серой и марганцем кремнии наблюдаются оба типа неустойчивости тока [2, 9-11]. В то же время в Si, компенсированном Zn, наблюдается неустойчивость тока первого типа [1-8]. Какие-либо данные по наблюдению неустойчивости тока второго типа для этого материала в литературе отсутствуют.

В данной работе сообщается о наблюдении стабильных автоколебаний фототока инфранизких частот ($10^{-3} \div 10$ Гц) с большой амплитудой ($1 \div 400$ мА) и $\sim 100\%$ -й модуляцией в компенсированных и перекомпенсированных образцах Si(Zn) в температурном интервале $T = 77 \div 200$ К с воспроизводимыми параметрами (т. е. для образцов с определенным удельным сопротивлением ρ при постоянных значениях напряженности электрического поля E , освещенности L и температуры T можно получить стабильные автоколебания с определенными параметрами независимо от вида контакта, размера и времени изготовления образца).

Диффузия цинка в кремнии проводилась по разработанной нами технологии [12], которая позволяла получить как компенсированные, так и перекомпенсированные образцы в широком интервале значений удельного сопротивления. При этом в качестве исходного материала использовался промышленный кремний марки КЭФ-1 с концентрацией дислокаций $N_d \sim 10^3$ см $^{-2}$.

Образцы Si(Zn) размерами $3 - 10 \cdot 2.5 - 3 \cdot 0.5 - 1.5$ мм включались в цепь, состоящую из последовательно соединенного источника постоянного напряжения

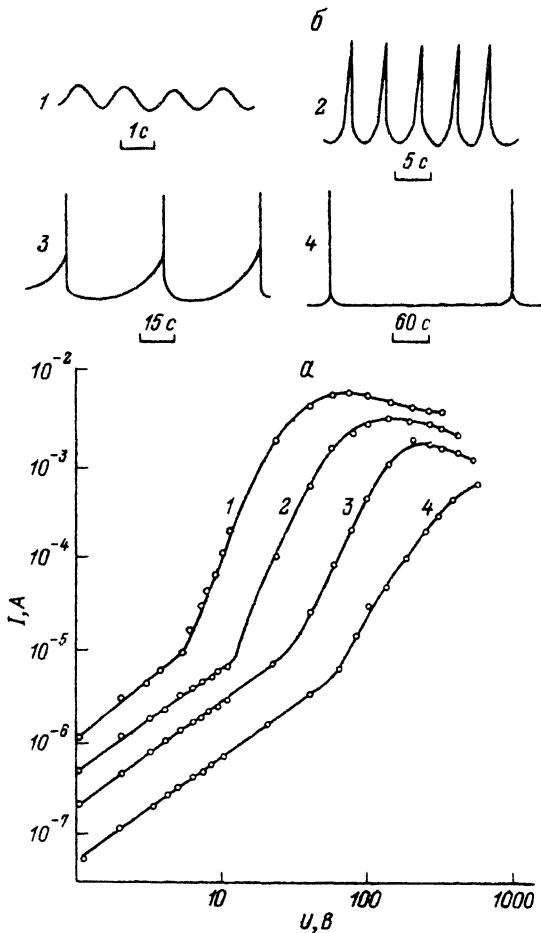


Рис. 1. *a* — ВАХ образца $n\text{-Si(Zn)}$ с $\rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при различных интенсивностях интегрального света, лк: 1 — 5, 2 — 1, 3 — 0.1, 4 — 0.01; $T = 77 \text{ К}$. *б* — формы автоколебания фототока в образце $n\text{-Si(Zn)}$ с $\rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при различных интенсивностях интегрального света, лк: 1 — 5, 2 — 1, 3 — 0.1, 4 — 0.01.

и нагрузочного сопротивления R_H ($R_H = 10^3 \text{ Ом}$). В цепи создавался режим генератора напряжения ($R_{\text{обр}} \gg R_H$). В качестве контакта использовался электролитически осажденный никель или сплав InGa .

На рис. 1, *a* представлены стационарные ВАХ образца $n\text{-Si(Zn)}$ с $\rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при различных интенсивностях возбуждающего света из собственной полосы поглощения при температуре жидкого азота. При небольших напряжениях, приложенных к образцу, выполняется закон Ома, дальнейшее увеличение напряжения приводит к отступлению от линейности (зависимость тока $I = U^n$, где $n > 1$). В большинстве случаев наблюдается квадратичный участок. При напряжениях, превышающих некоторую критическую величину $U_{\text{кр}}$, появляется участок отрицательной дифференциальной проводимости (ОДФ). При этом с увеличением интенсивности освещения области существования всех этих участков по напряжению сдвигаются в сторону меньших значений. Дальнейший рост U приводит к возбуждению колебаний фототока. При этом формы автоколебаний в зависимости от условий эксперимента были различными (рис. 1, *б*). Пороговое поле возбуждения колебаний тока $E_{\text{п}}^{\text{мин}}$ смещается в сторону больших полей с

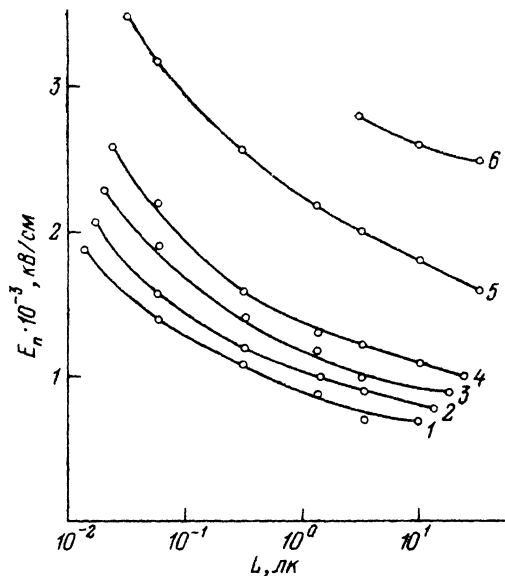


Рис. 2. Зависимость порогового поля E_n^{\min} от интенсивности освещения для образцов Si(Zn) с различными удельными сопротивлениями. ρ , Ом·см: 1—20, 2— $1.3 \cdot 10^2$, 3— $1.2 \cdot 10^3$, 4— $1.1 \cdot 10^4$, 5— $5.7 \cdot 10^4$, 6— $5.0 \cdot 10^4$. 1—5—Si(Zn) *n*-типа, 6—Si(Zn) *p*-типа.

увеличением ρ . С ростом E (при $E > E_n^{\min}$) наблюдается увеличение как амплитуды, так и частоты, при этом изменение частоты в исследуемом интервале напряженности электрического поля может достигать двух порядков. При некотором критическом значении $E_{кр}^{\max}$ колебания в цепи срываются. Значения E_n^{\min} лежат на интервале от 420 до 10^3 В/см.

Исследование влияния интенсивности интегрального освещения на условия возбуждения колебаний тока показало, что для *n*-Si(Zn) она лежит в интервале значений 10^{-2} —30 лк, а для *p*-Si(Zn) — в интервале 10—30 лк. При этом установлено, что с увеличением интенсивности освещения пороговое поле E_n^{\min} сдвигается в сторону меньших значений (рис. 2). Следует отметить, что величины порогового поля и интенсивности освещения выше для образцов *p*-Si(Zn), чем у образцов *n*-Si(Zn), с одинаковым ρ (рис. 2, кривые 4, 5).

Автоколебания тока в образцах Si(Zn) в отличие от подобных колебаний тока, обнаруженных в других компенсированных материалах [10, 11], имеют ряд особенностей:

- в Si(Zn) автоколебания тока наблюдаются не только в сильно компенсированных образцах ($\rho \sim 10^4 + 10^5$ Ом·см), как в [10, 11], но и в материалах с удельными сопротивлениями $\rho \sim 20 + 10^5$ Ом·см, что представляется нам более важным фактом, так как получение материала с $\rho \sim 10^4 + 10^5$ Ом·см представляет большие технологические трудности;

- амплитуда автоколебаний тока в наших экспериментах достигает 400 мА, а глубина модуляции составляет $\sim 100\%$, что значительно больше, чем параметры автоколебаний, наблюдаемых в работах [10, 11];

- параметры автоколебаний (особенно амплитуда) и пороговое поле E_n очень чувствительны к освещению светом (как интегральному, так и монохроматическому). Существует четкая корреляция между параметрами колебаний и интенсивностью освещения, что предоставляет возможность создания новых типов датчиков с амплитудно-частотным выходом;

— интервал температур, где наблюдаются автоколебания тока, намного шире, чем у других материалов [10, 11];

— автоколебания тока легко управляются по форме импульсов изменением поля E и освещенности L .

Для выяснения механизма наблюдаемых автоколебаний тока были проведены измерения температурной зависимости фотопроводимости (ФП), где было обнаружено глубокое температурное гашение ФП (ТГ ФП). При этом глубина гашения достигает 3—3.5 порядка. Поэтому, согласно [13], можно предположить, что наблюдаемые автоколебания тока в образцах Si(Zn) по природе близки к температурно-электрической неустойчивости (ТЭН) тока. Однако приведенные нами оценки (согласно [14, 15]) показали существенное отличие параметров автоколебаний тока и глубины ТГ ФП в образцах Si(Zn) от экспериментальных, т. е. существующая теория не в состоянии объяснить столь глубокое ТГ ФП и большие амплитуды колебаний тока. Поэтому мы предполагаем, что в моделях ТГ ФП и автоколебаний тока, предложенных [14, 15], не учтено влияние внутренних локальных потенциалов нескомпенсированных заряженных примесных центров, величина которых существенно увеличивается в области низких температур. Увеличение величины потенциала влияет не только на распределение неравновесных носителей тока, но и на энергетический спектр и сечение захвата ГЦ, что в свою очередь влияет на свойства материала.

Кроме того, существование суперлинейного участка ВАХ показывает на инжекцию носителей тока через контакты, которую необходимо учитывать для оценки изменения степени заполнения ГЦ.

В настоящее время нами ведутся исследования по этим направлениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] П. В. Богун, Б. В. Карпова, Б. В. Корнилов, В. В. Привезенцев. ФТП, 14, 1224 (1980).
- [2] Л. М. Капитонова, А. А. Лебедев, А. Т. Мамадалимов, Н. А. Султанов. ФТП, 6, 1779 (1972).
- [3] N. Holonyak, Jr., S. F. Bevacqua. Appl. Phys. Lett., 2, 71 (1963).
- [4] J. S. Moore, C. M. Penchina, N. Holonyak, Jr., M. D. Sirkis, T. Yamada. J. Appl. Phys., 37, 2000 (1966).
- [5] J. S. Moore, N. Holonyak, Jr., M. D. Sirkis. Sol. St. Electron., 10, 823 (1967).
- [6] V. G. Streetman, M. M. Blouke, N. Holonyak, Jr. Appl. Phys. Lett., 11, 200 (1967).
- [7] M. M. Blouke, N. Holonyak, Jr., V. G. Streetman, H. R. Zwicker. Sol. St. Electron., 13, 337 (1970).
- [8] Ю. И. Завадский, Б. В. Корнилов. ФТП, 11, 1494 (1969).
- [9] М. К. Бахадырханов, И. П. Парманкулов. ФТП, 23, 1646 (1989).
- [10] М. К. Бахадырханов, Н. Ф. Зикриллаев. ФТП, 18, 2220 (1984).
- [11] М. К. Бахадырханов, Ш. И. Аскарров, С. С. Нигманходжаев, К. А. Самигов, Б. З. Шарипов, И. П. Парманкулов. ФТП, 21, 1315 (1987).
- [12] М. К. Бахадырханов, Н. Ф. Зикриллаев, Э. У. Арзикулов. Письма ЖТФ, 17, 1 (1991).
- [13] С. Г. Калашников, Г. С. Падо, В. И. Пустовойт, Е. Ф. Токарев. ФТП, 3, 1028 (1969).
- [14] С. Г. Калашников, В. И. Пустовойт, Г. С. Падо. ФТП, 4, 1255 (1970).
- [15] А. Роуз. Основы теории фотопроводимости, 123. М. (1962).

Редактор Ю. Б. Лянда-Геллер