

©1994 г.

## РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ СЕРОЙ

*М.К.Бахадырханов, У.Х.Курбанова*

Ташкентский государственный технический университет им. Беруни,  
Ташкент, Узбекистан

(Получена 25 июня 1993 г. Принята к печати 29 сентября 1993 г.)

Рассматривается влияние рекомбинационных волн в кремнии, легированном серой, на условия возбуждения и параметры колебаний тока.

Выявлено, что наблюдаемые колебания тока по параметрам и условиям возбуждения отличаются от ранее обнаруженных колебаний тока в кремнии, легированном марганцем, и кремнии, легированном цинком. Это дает основание считать, что наблюдаемые нами колебания тока в образцах кремния, легированных серой, имеют природу рекомбинационных волн.

Автоколебания тока типа рекомбинационных волн (РВ) в полупроводниках, впервые теоретически предсказанные авторами [1-3], экспериментально обнаруживались в ряде полупроводниковых материалов [4-6]. В работах [4-6] это явление изучено более подробно и при этом установлена корреляция между параметрами РВ в полупроводниковых материалах.

Анализ показывает, что в работах [4-6] в качестве компенсирующих примесей были выбраны такие элементы (Mn, Au, Zn), которые создают в Si глубокие энергетические уровни близко к середине запрещенной зоны, что и соответствует требованиям возникновения РВ [1-3]. В этом плане представляет интерес обнаружение РВ в Si с глубокими примесями, энергетические уровни которых лежат не в середине запрещенной зоны (например, S в Si). Как известно, сера в кремнии создает два донорных уровня с энергией ионизации  $E = E_c - 0.18$  и  $E_c - 0.37$  эВ, т.е. оба уровня находятся далеко от середины запрещенной зоны [6-8]. Кроме того концентрация электроактивных атомов серы в кремнии почти на порядок больше, чем Mn в Si и в Ge, а также Zn в Si. Поэтому в данной работе исследовалась возможность обнаружения РВ в Si(S) и ее особенности. Такие исследования, как нам кажется, не только обогащают экспериментальные результаты и позволяют более глубоко понять природу этого явления, но и позволяют использовать результаты на практике. Если учесть еще, что Si(S) является

фоточувствительным материалом как в собственной, так и в примесной области ( $\lambda = 1 \div 5$  мкм) [6-7], то обнаружение РВ в Si(S) позволяет не только получить автоколебания тока с заданными параметрами, но и создать новые типы фотоприемников с частотно-амплитудным выходом.

При исследовании использовались исходные образцы промышленного кремния марки КДБ-1, с размерами  $8 \times 3 \times 1$  мм<sup>3</sup>. Диффузия серы в кремнии проводилась по разработанной нами технологии [8]. При этом диффузия S в Si проводилась при постоянной температуре ( $T = 100$  К) с различными давлениями паров диффузанта. Такая технология легирования Si серой позволяет получить не только однородное легирование материала с воспроизводимыми свойствами и управлять концентрацией электроактивных атомов серы, но и довести до минимума роль термических дефектов и соответственно уменьшить их влияние на свойства материала. После диффузии S в Si были получены как компенсированные ( $p$ -Si(S)), так и перекомпенсированные образцы ( $n$ -Si(S)) с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^2 \div 10^5$  Ом·см при  $T = 300$  К. При этом концентрация электроактивных атомов серы составляет  $(1 \div 3) \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Для исследования автоколебаний тока образцы включались в цепь последовательно с батареей и нагрузочным сопротивлением, причем нагрузочное сопротивление много больше сопротивления образца, что соответствует режиму генератора напряжения. Сигнал с нагрузочного сопротивления 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(S) возбуждались при комнатной температуре, в темноте, когда электрическое поле превышало некоторое пороговое значение  $E_{th}$ , независимо от вида омического контакта и обработки поверхности.

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) образцов Si(S) показали, что при  $E < E_{th}$  ВАХ почти линейно возрастает в высокоомных образцах, а с уменьшением  $\rho$  — описывается степенным законом  $I \sim U^n$ , где степень  $n$  меняется от 1 до 1.56, а при напряженности поля больше порогового степень  $n$  заметно уменьшается. Наблюдаемые колебания тока, независимо от параметров материала, вблизи порога имеют синусоидальную форму и слабо изменяются по мере изменения электрического поля. При заданной напряженности электрического поля форма и другие параметры колебаний тока являются стабильными и воспроизводимыми.

На рис. 1 приведены зависимости  $E_{th}$  и пороговой частоты  $f_{th}$  от образцов  $\rho$  в Si(S). Как видно из рисунка, автоколебания наблюдаются в образцах с  $\rho \geq 10^2$  Ом·см, т.е. при значительно меньшем  $\rho$ , чем в Si(Mn), Si(Zn) и т.д. При этом установлено, что значение  $E_{th}$  с ростом  $\rho$  практически монотонно увеличивается от 20 до 250 В/см при изменении удельного сопротивления образцов  $\rho = 10^2 \div 10^5$  Ом·см и описывается соотношениями  $E_{th} = E_0(1 + \alpha\rho)$ , где  $E_0$  — пороговое напряжение в образцах с  $\rho = 10^2$  Ом·см,  $\alpha$  — коэффициент ( $\alpha = 2.3 \cdot 10^{-3}$  В/см). Результаты исследования показали, что при  $E = E_{th}$  амплитуда колебаний тока меняется в интервале 300–500 мА в зависимости от образцов  $\rho$ . Значение амплитуды колебаний в Si(S) почти в 2–3 раза больше, чем

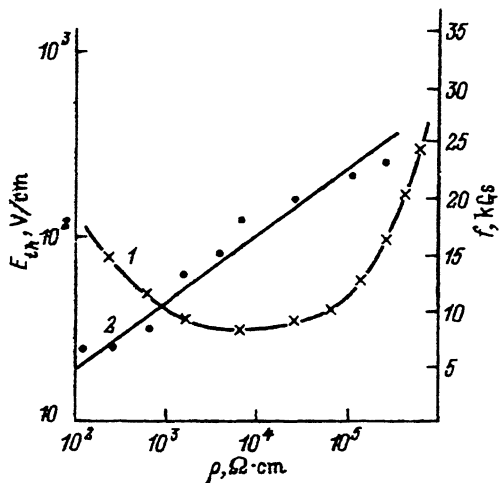


Рис. 1. Зависимости порогового поля  $E_{th}$  (2) и пороговой частоты  $f_{th}$  (1) от  $\rho$  образцов кремния, легированного серой.

в образцах Si(Mn), Si(Zn) [9], а коэффициент модуляции  $K$  ( $K = \frac{I-I_0}{I_0}$ ) достигает 40÷45%. В образцах Si(Mn)  $K = 0.1 \div 1\%$ , в Si(Zn)  $K = 1 \div 7\%$ .

Следует отметить, что пороговая частота  $f_{th}$  с ростом  $\rho$  меняется немонотонно: сначала  $f_{th}$  с ростом  $\rho$  уменьшается до минимума при  $\rho \approx 5 \cdot 10^3$ , а затем растет (особенно быстро при  $\rho \geq 5 \cdot 10^4$  Ом·см), т.е. зависимость  $f_{th}(\rho)$  также существенно отличается от результатов, полученных в образцах Si(Mn), где зависимость  $f_{th}(\rho)$  имеет линейный характер [6].

Результаты исследований полевых зависимостей параметров колебаний тока, полученные при комнатной температуре ( $T = 300$  К) для образцов Si(S) с различным удельным сопротивлением, приведены на

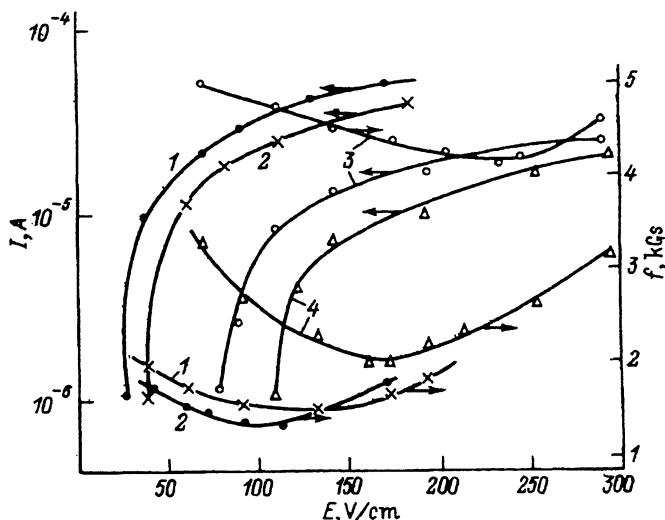


Рис. 2. Полевые зависимости параметров колебаний тока в образцах Si(S) при различных  $\rho$ , Ом·см: 1 —  $10^2$ , 2 —  $10^3$ , 3 —  $2 \cdot 10^4$ , 4 —  $5 \cdot 10^5$ .

рис. 2. Следует отметить, что зависимость амплитуды колебания тока от  $E$  состоит из четко выраженных двух участков: в первой области наблюдается резкое увеличение  $I_{th}$  в интервале  $E_{th} + \Delta E$  (где  $\Delta E$  составляет  $20 \div 25$  В), во второй области, когда  $E > E_{th} + \Delta E$ , с ростом  $E$  амплитуда колебаний тока растет медленно и стремится к насыщению. С ростом удельного сопротивления материала характер зависимости  $I(E)$  практически не меняется, но полностью смещается в сторону высоких напряжений, а величина  $I_{th}$  постепенно уменьшается. Что касается частоты колебаний тока, то по мере роста  $E$  ее величина уменьшалась до своего минимального значения (при  $E \sim E_{th}$ ) и затем возрастала за счет появления дополнительных гармоник. С ростом материала  $\rho$  величина  $E_{th}$  смещалась в сторону высоких полей.

Анализ полученных результатов показывает, что наблюдаемые колебания тока по параметрам и условиям возбуждения (они наблюдаются при комнатной и более высоких температурах, частота колебаний тока составляет несколько кГц, пороговое поле  $E_{th}$  достаточно низкое и линейно растет с ростом образцов  $\rho$ ) отличаются от ранее обнаруженных колебаний тока в Si(Zn) и Si(Mn) [7,8], что дает основания считать, что они имеют природу колебаний типа РВ.

Как известно, в [5] РВ наблюдаются при выполнении ряда условий. Концентрация неосновных носителей тока должна быть достаточно большой, чтобы выполнялось условие

$$d = \frac{n_0 \tau_p}{p_0 \tau_n} > 1, \quad (1)$$

где  $\tau_p, \tau_n$  — времена захвата электронов и дырок,  $p_0$  и  $n_0$  — равновесные концентрации дырок и электронов в материале.

Дрейфовая длина дырок должна быть больше диффузионной

$$\mu_p E / (\tau_p D_p) > 1, \quad (2)$$

при этом частота колебаний тока и пороговое поле колебаний тока имеют следующий вид:

$$f_{th} = \frac{f_{th}}{2\pi} \sqrt{(\alpha - 1)(\sqrt{\alpha} + 1)}, \quad E_{th} = \frac{\sqrt{D_p \tau_p}}{\mu_p} \frac{(1 + \sqrt{\alpha + 1})}{\sqrt{\alpha - 1}}. \quad (3)$$

Расчеты, проведенные нами с учетом основных параметров энергетических уровней S ( $E_c - 0.37$ ) в Si [9,10], показали, что действительно в исследуемых образцах с  $\rho \sim 10^2 \div 10^5$  Ом·см условия (1) и (2) выполняются. Это дает нам основание считать, что наблюдаемые нами колебания тока в образцах Si(S) имеют природу РВ.

Расчитанные согласно (3) зависимости  $f_{th}$  и  $E_{th}$  от  $\alpha$  (т.е. от  $\rho$ ) для исследуемых образцов показали качественное совпадение с экспериментальными результатами. Некоторое количественное несоответствие между экспериментальными и расчетными результатами видимо связано с погрешностями в определении  $\tau_n, \tau_p$  и энергетических уровней S в Si.

## Список литературы

- [1] О.В. Константинов, В.И. Перель. ФТТ, **6**, 3364 (1964).
- [2] О.В. Константинов, В.И. Перель, Г.В. Царенков. ФТТ, **9**, 1761 (1967).
- [3] О.В. Константинов, В.И. Перель. ФТТ, **10**, 876 (1968).
- [4] И.В. Карпова, С.Г. Калашников. Письма ЖЭТФ, **6**, 954 (1967).
- [5] Ю.И. Завадский, Б.В. Корнилов. ФТТ, **11**, 1494 (1969).
- [6] М.К. Бахадырханов, И.П. Парманкулов. ФТП, **23**, 1646 (1989).
- [7] R.O. Carlson. Phys. Rev., **104**, 937 (1956).
- [8] М.К. Бахадырханов, Ш.И. Аскарлов, С.С. Нигманходжаев, Е.А. Самигов, Б.З. Шарипов, И.П. Парманкулов. ФТП, **21**, 1315 (1987).
- [9] А.А. Лебедев, А.Т. Мамадалимов, Ш. Махкамов. ФТП, **6**, 2198 (1972).
- [10] А.А. Лебедев, А.Т. Мамадалимов, Ш. Махкамов. ФТП, **8**, 262 (1974).

Редактор В.В. Чалдышев

## Recombination Waves in Sulphur-Doped Silicon

*M.K. Bakhadyrkhanov and U.H. Kurbanova*

Beruni State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

---