

## ВЛИЯНИЕ ХРОМА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ

Н. А. КАЛЬНЕВ, Я. А. ПОТАПЕНКО, А. М. ДЬЯЧЕНКО, Ю. Д. ЧУВАШЕВ

Приведены результаты исследования влияния хрома на электрофизические свойства кремния. Теоретически и экспериментально определена энергия активации глубоких уровней, создаваемых в кремнии атомами хрома.

Для решения прикладных задач современной полупроводниковой техники представляет интерес исследование примесей, создающих глубоколежащие уровни в кремнии, так как на их основе можно создать большое количество различных типов полупроводниковых приборов [1—2].

Примесные уровни, образуемые в монокристаллическом кремнии элементами 6-й группы, исследованы сравнительно мало. Литературные данные [3, 4] о положении энергетических уровней хрома в кремнии очень противоречивы. Так, в работе [3] говорится, что хром образует в кремнии два энергетических уровня  $E_c - 0,22$  эв и  $E_v + 0,11$  эв (двухзарядный донор). Аналогичные исследования, проведенные в работе [4], показали, что энергия активации донорного уровня равна  $E_c - 0,41 + 0,01$  эв.

Нами была поставлена задача уточнения положения энергетических уровней  $C_T$  в кремнии. Для экспериментального исследования влияния хрома на электрические свойства кремния были использованы образцы монокристаллического кремния дырочного типа проводимости с концентрацией бора  $7,8 \cdot 10^{12} - 1,5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> ( $2 \cdot 10^3 - 10$  ом см). Легирование хромом производилось диффузионным методом при  $T = 1250^\circ\text{C}$  в откачных кварцевых ампулах в потоке водорода. Источником служил особо чистый хром. Для оценки влияния термического отжига на свойства исходных образцов проводился контрольный отжиг в тех же режимах, но без хрома.

Исследуемые образцы после введения хрома инверсировались в  $n$ -тип, а образцы без хрома оставались дырочными после термообработки. Концентрация хрома в образцах определялась по намечающемуся плато в температурной зависимости в области температур  $410^\circ\text{K}$ , а также находилась по данным изменения концентрации акцепторов в контрольных низкоомных образцах  $p$ -типа кремния, которые после диффузии  $C_T$  при  $T = 1250^\circ\text{C}$  превращались в собственный полупроводник с  $\rho = 2 \cdot 10^5$  ом см или меняли тип проводимости. Кроме того, применялся наиболее распространенный метод исследования ловушек в кристаллах, метод термостимулированной проводимости, для опре-

деления концентрации центров прилипания, которыми служили атомы хрома.

На рис. 1 приведены температурные зависимости коэффициента Холла для образцов с различной исходной концентрацией акцепторов.

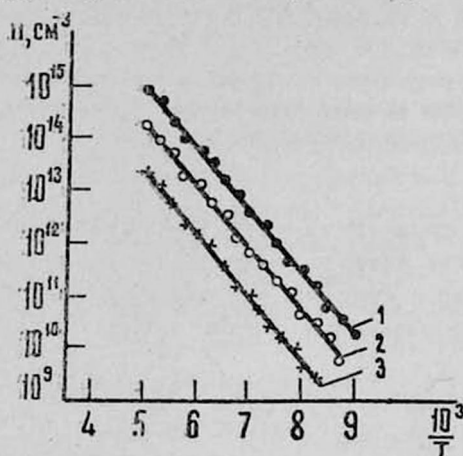


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации электронов проводимости для образцов с различной концентрацией бора.

Как видно из рисунка, кривые имеют один и тот же наклон, энергия активации равна  $(0,24 \pm 0,01)$  эв. Концентрация электрически-активного хрома в образцах оказалась равной  $M = 9,8 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>.

Зная концентрацию атомов хрома, введенных в кремний, и исходную концентрацию акцепторов, можно рассчитать энергию активации глубокого уровня на основе уравнения электронейтральности в интервале температур 100–200°K:

$$n = q \frac{N_{Cr} - N_a}{N_a} N_c \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $q$  — фактор вырождения,  $E$  — энергия активации верхнего уровня хрома,  $N_a$  — концентрация свободных носителей тока (акцепторов),  $N_c$  — эффективная плотность состояний,  $N_{Cr}$  — концентрация электрически-активного хрома в растворе.

Рассчитанная теоретически с использованием (1) температурная зависимость концентрации носителей совпала для  $E = E_c - 0,245$  эв,  $q = 2$  с кривой 1 на рис. 1.

Если атомы хрома в кремнии являются двухзарядными ионами, то второй энергетический уровень  $E_v + 0,11$  эв должен наблюдаться в образцах кремния с концентрацией, превышающей концентрацию атомов хрома. Проведенные исследования на образцах, которые после введения  $Cr$  не инверсировались, показали, что в дырочном кремнии проявляется энергетический уровень с энергией активации  $E_v + 0,11$  эв (график не приводится, чтобы не загромождать работу).

Для уточнения глубины залегания энергетических уровней в кремнии с примесью хрома дополнительно применялся метод термостимулированной проводимости (ТСП). На рис. 2 приведена кривая ТСП при скорости нагревания образца  $0,14 \text{ град/сек}$ . Максимум ТСП соответствует температуре  $232^\circ\text{K}$ ; температура, при которой термостимулированный ток имеет величину, составляющую половину максимальной, равна  $223^\circ\text{K}$ .

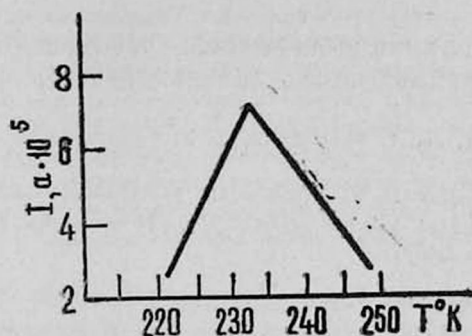


Рис. 2. Кривая термостимулированной проводимости.

Проведенный анализ зависимости  $T_M$  от степени заполнения уровней прилипания позволяет нам заключить, что мы имеем дело с быстрыми уровнями прилипания. Для них удобно воспользоваться уравнением для определения глубины залегания энергетического уровня в виде [5]:

$$E = k T_M \ln \frac{N_c}{n_M}, \quad (2)$$

где  $T_M$  — температура максимума термостимулированной проводимости,  $n_M$  — концентрация электронов проводимости, соответствующая температуре максимума. Определенная из выражения (2) глубина залегания энергетического уровня в электронном кремнии равна  $0,24 \text{ эв}$ .

На основе проведенного исследования можно отметить, что глубина залегания донорного уровня хрома равна  $(0,24 \pm 0,01) \text{ эв}$ , а противоречивость данных авторов [3, 4] связана, по-видимому, с тем, что для некомпенсированных и компенсированных полупроводников применяются различные формулы для вычисления глубины залегания энергетических уровней. Проведенные исследования позволяют рассчитать необходимые режимы диффузионного легирования для получения компенсированного кремния с заданными параметрами.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. А. Лебедев, Н. А. Султанов. ФТП, 5, 22 (1971).
2. Н. А. Кальнев, И. Н. Майдан. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 532 (1974).
3. А. А. Золотухин, Л. С. Милевский. ФТТ, 6, 1906 (1971).
4. А. А. Лебедев, Н. А. Султанов. ФТП, 4, 1916 (1970).
5. П. Г. Литовченко. Сб. Актуальные вопросы физики полупроводников и полупроводниковых приборов, Вильнюс, 1969, стр. 125.

ՔՐՈՄԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՐԵՄՆԻՈՒՄԻ  
ԷԼԵԿՏՐԱՏԻՉԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ն. Ա. ԿԱԼՆԵՎ, Յա. Լ. ՊՈՏԱՊԵՆԿՈ, Ա. Մ. ԴՅԱԿԵՆԿՈ, Յու. Դ. ՉՈՒՎԱՇԵՎ

Աշխատանքում բերվում են միաբյուրեղային կրեմնիումում տեսակարար դիմադրության, հիմնական հոսանքակիրների կոնցենտրացիայի և շարժունակության վրա քրոմի ազդեցության ուսումնասիրման արդյունքները:

CHROMIUM EFFECT ON THE ELECTRICAL  
PROPERTIES OF SILICON

N. A. KAL'NEV, Ya. L. POTAPENKO, A. M. D'YACHENKO,  
Yu. D. CHUVASHEV

The results of the investigation of chromium effect on the specific resistance the concentration and the mobility of majority carriers of current in monocrystalline silicon are given. The monocrystalline specimens of silicon with hole-type conductivity having the specific resistance  $\rho = 2 \cdot 10^3 \div 10 \text{ ohm/cm}$  were used. The activation energy of deep levels in silicon induced by chromium atoms was calculated and measured.