

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ВТОРИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ
В КРЕМНИИ p-ТИПА

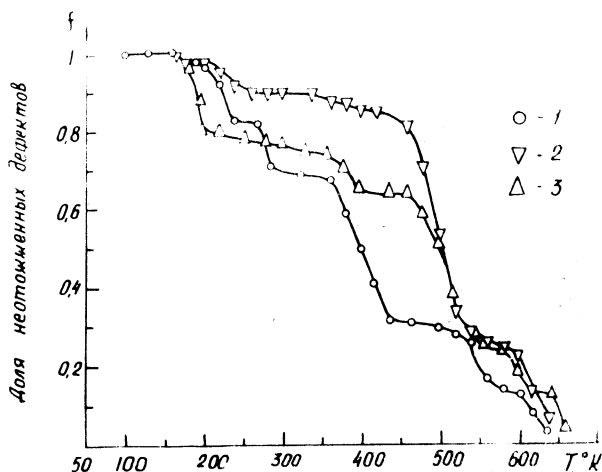
В. С. Вавилов, Б. Н. Мухомов, А. В. Спицын

К настоящему времени выполнено сравнительно мало работ по изучению взаимодействия простейших дефектов с примесями и выяснению их роли в образовании вторичных дефектов в кремнии p-типа /1/. Данная работа была предпринята с целью получения дополнительных сведений о природе вторичных радиационных нарушений в этом материале.

Образцы кремния p-типа с содержанием кислорода $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, легированные бором, алюминием или галлием, облучались при 78°K электронами с энергией 1,5 мэв, а затем подвергались изохроному отжигу в интервале температур $78 + 700^\circ\text{K}$. Сведения об отжиге и уровнях радиационных дефектов получались из анализа данных о концентрации носителей, определявшейся, в свою очередь, с помощью измерений эффекта Холла и электропроводности.

Прежде всего была исследована зависимость концентрации удаленных носителей (измеренной при 78°K) от температуры отжига. Во всех случаях наблюдалась стадия восстановления концентрации носителей около 180°K , которая, по-видимому, связана с отжигом нейтральной вакансии /2/ (рис. 1). В высокотемпературной области 380°K обнаружено три стадии отжига. Особенно сильно выражена стадия отжига, лежащая в интервале $380+500^\circ\text{K}$ для образцов, легированных бором, и в диапазоне $460+560^\circ\text{K}$ для образцов, легированных алюминием или галлием. Анализ этих стадий отжига показал, что восстановление концентрации дырок достаточно хорошо описывается уравнением для квази-химических реакций в предположении кинетики первого порядка. Энергия активации, определенная из кривых отжига, оказалась равной $0,42 \pm 0,06$ эв (для образцов, легированных бором), $0,66 \pm 0,06$ эв (для образцов, легированных галлием) и $0,77 \pm 0,06$ эв

(для образцов, легированных алюминием). Данная зависимость от ковалентного радиуса примеси подобна той, которую наблюдали Хирата и др. /3/ в кремнии *n*-типа для отжига комплексов вакансия -

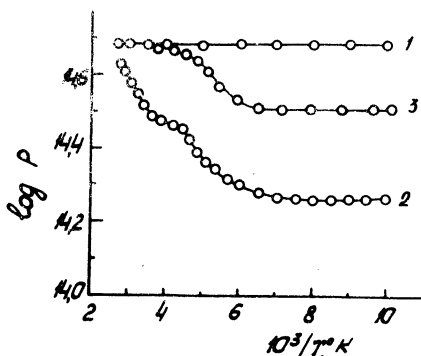


Р и с. 1. Изохронный отжиг образцов кремния, полученного методом бестигельной зонной плавки ($\rho \sim 20$ ом. см) $T_{\text{обл}} = 78^\circ\text{K}$; $T_{\text{изм}} = 78^\circ\text{K}$; $\Phi = 5,4 \cdot 10^{15}$ эл/см². 1 - основная примесь - бор; 2 - основная примесь - алюминий; 3 - основная примесь - галлий.

донорная примесь. В кремнии *p*-типа влияние размеров атомов акцепторной примеси на процессы отжига обнаружено впервые.

Для выяснения энергетического положения уровней дефектов, отжигающихся при температурах выше 380°K , проводилось измерение температурной зависимости концентрации дырок в диапазоне $78 + 380^\circ\text{K}$. Кривые, независимо от типа легирующей примеси, имели вид, показанный на рис. 2 (кривая 2). Анализ показал наличие уровней $E_v + (0,28 \pm 0,02)$ эв и $E_v + (0,45 \pm 0,02)$ эв. После отжига при температуре 560°K дефекты, соответствующие уровню $E_v + (0,45 \pm 0,02)$ эв, исчезали (рис. 2). Отсюда можно было сделать вывод, что дефектам, у которых энергия активации для отжига зависит от размеров атомов легирующей примеси, принадлежит уровень $E_v + (0,45 \pm 0,02)$ эв.

Представляет интерес сравнить наши данные с результатами других работ. В. С. Вавиловым и др. /4/ при исследовании спектров фотопроводимости в "сверхчистом" кремнии р-типа (остаточная концентрация бора $(5 - 10) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$) был обнаружен единственный уровень в запрещенной зоне кремния $E_{\text{v}} + 0,45$ эв. Поэтому появ-



Р и с. 2. Температурная зависимость концентрации дырок для образцов кремния, легированных алюминием. $\Phi = 5,4 \cdot 10^{15} \text{ эв/см}^2$. 1 — до облучения; 2 — после отжига при 380°K ; 3 — после отжига при 560°K .

ление этого уровня было связано с атомами бора. Уоткинсом /5/ было показано, что в кремнии р-типа, легированном алюминием, при облучении возникают центры (атом алюминия - вакансия), температура отжига которых находится в области $480 + 560^\circ\text{K}$, т.е. совпадает с интервалом рассматриваемой стадии в образцах, легированных алюминием.

Следовательно, одинаковое энергетическое положение уровней дефектов, зависимость энергии активации отжига от размеров атомов акцепторной примеси и сравнение с результатами работ /4/, /5/ указывает на то, что эти дефекты представляют комплекс вакансия - акцепторная примесь.

Дефекты, отжигающиеся при 580°K , которым принадлежит уровень $E_{\text{v}} + (0,28 \pm 0,28) \text{ эв}$, представляют собой дивакансии и К-центры /6/, /7/.

Поступила в редакцию
5 июня 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. H. Stein. Radiation Defects in Semiconductors, Ed. J. Corbett and G. Watkins (Gordon and Breach, Science Publishers, 1971), p.125.
2. G. Watkins. J. Phys. Soc. Japan, 18, Suppl. 11, 22 (1963).
3. M. Hirata et al. J. Phys. Soc. Japan, 27, 405 (1969).
4. В. С. Вавилов и др. ФТТ, 7, 503 (1965).
5. G. Watkins. Phys. Rev., 155, 802 (1967).
6. G. Watkins and J. Corbett. Phys. Rev., 136, A543 (1965).
7. N. Almeleh and B. Goldstein. Phys. Rev., 149, 687 (1966).