

©1994 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЖИГА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В $n\text{-SiC}(6H)_3$ ОБЛУЧЕННОМ ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

И.Г.Атабаев, М.С.Саидов, Т.М.Салиев, Х.А.Шамуратов

Научно-производственное объединение «Физика-солнце» при Физико-техническом институте им. С.В. Стародубцева Академии наук Узбекистана, 700084, Ташкент, Узбекистан
(Получена 27 июля 1993 г. Принята к печати 17 марта 1994 г.)

Приведены результаты исследования влияния отжига на радиационные дефекты в $n\text{-SiC}(6H)$, облученном тепловыми нейтронами в дозах $10^{19}\text{--}10^{20}\text{ см}^{-2}$. Отжиг проводился в вакууме в интервале температур 600–1000 °С. Измерялась концентрация электронов, оптическое поглощение, фотопроводимость. Установлено существование двух групп дефектов с энергиями активации отжига ~ 1 и ~ 3 эВ.

Исследование дефектов в SiC вызывает интерес в связи с возможностью изготовления полупроводниковых приборов, работающих при высоких температурах.

Анализ экспериментальных данных по точечным дефектам в SiC(6H), приведенных в [1], показал, что как закалка от высоких температур, так и радиационная обработка (электроны, нейтроны) генерируют точечные дефекты вакансионной и примесно-вакансионной природы. При этом микроструктура дефектных центров, введенных этими методами, в значительной степени идентична. Энергетические уровни наблюдаемых дефектов локализованы в интервале 0.4–1.5 эВ от дна зоны проводимости [1]. По мере облучения тепловыми нейтронами удельное сопротивление SiC растет, а затем в связи с возникновением проводимости по локализованным состояниям глубоких радиационных дефектов (РД) падает [2]. Из исследований люминесцентных и электрофизических свойств SiC, облученных нейтронами [3], определена энергия активации E_a процесса отжига этих дефектов [для центра N_1 , $E_a = (6.5\text{--}0.5)$ эВ]. Однако электрофизические измерения проводились только на образцах, прошедших термоотжиг (ТО) при температурах $T_a > 1000\text{--}1200^\circ\text{C}$. Большой разброс в величине E_a для центра N_1 показывает, что реально N_1 представляет собой группу дефектов.

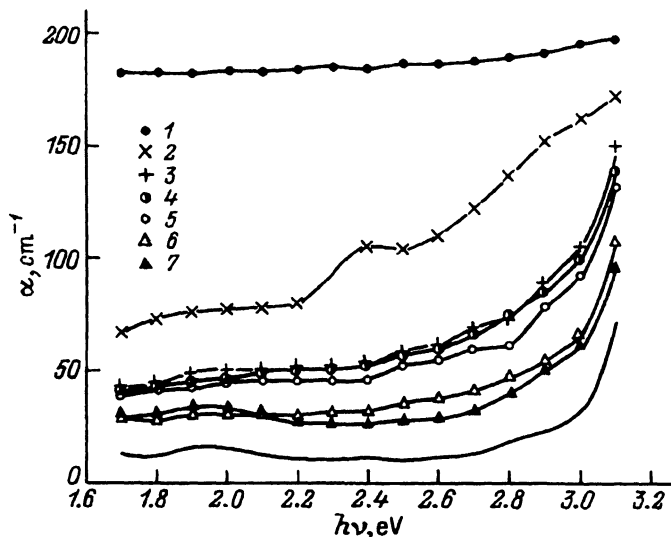


Рис. 1. Спектры поглощения образцов SiC до облучения (8) и после облучения нейтронами и отжига при T_a , °C: 1 — 0, 2 — 600, 3 — 700, 4 — 800, 5 — 900, 6 — 1000, 7 — 1100.

В работе исследовано влияние отжига (диапазон температур 600–1100 °C) на электрофизические свойства n -SiC(6H), с концентрацией $n \simeq (1.0 - 1.3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, облученных тепловыми нейтронами дозой $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-2}$. До облучения образцы были прозрачными и светло-зелеными, после облучения они становились непрозрачными и черными. Толщина образцов составляла 300–450 мкм.

Известно, что величина коэффициента оптического поглощения (α) в примесной области используется для оценки концентрации РД (N_{RD}) в полупроводниках [4]. При этом полагается, что величина α прямо пропорциональна N_{RD} . Очевидно, что этот метод позволяет контролировать только оптически активные РД. Спектры поглощения снимались при комнатной температуре в диапазоне 1.7–3.1 эВ. Коэффициент отражения рассчитывался по [5] и принимался равным 0.2.

Комбинированный изохронный и изотермический отжиг проводился в вакууме при остаточном давлении $10^{-3} - 10^{-2}$ мм рт.ст., в течение 15 мин при температурах 600, 700, 800, 900, 1000 и 1100 °C.

Интересной особенностью термоотжига SiC является сильная зависимость результатов от атмосферы, в которой проводится отжиг. Об атмосфере, в которой необходимо проводить отжиг SiC, в литературе имеются противоречивые сведения. Так, в результате 15-минутного отжига при 1380 °C на воздухе концентрация РД в облученном нейтронами SiC остается на уровне 10^{18} см^{-3} [3]. Кристаллы остаются темными и непрозрачными, что также свидетельствует о высокой концентрации РД. Водородная среда резко снижает температуру, необходимую для отжига РД [6]. В нашем случае ТО проводился в вакууме и, как видно из рис. 1, отжиг при 1100 °C приводит к частичному восстановлению формы спектра поглощения исходного образца, и образец становится прозрачным. Однако полного восстановления α исходного

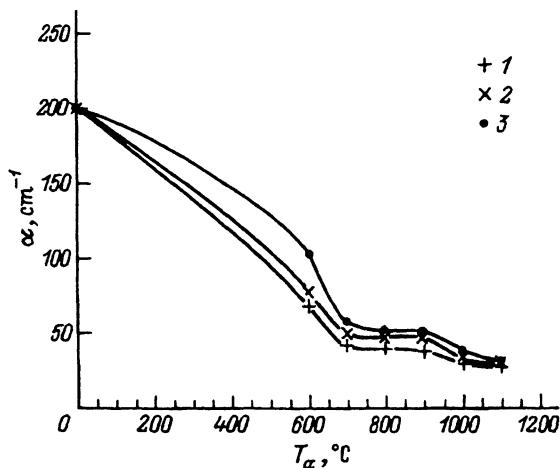


Рис. 2. Изменение поглощения в образцах в ходе термоотжига. $h\nu$, эВ: 1 — 1.7, 2 — 2.0, 3 — 2.4.

образца не происходит. Влияние среды, видимо, не связано с условиями теплоотвода (влияющими на кинетику отжига), так как и вакуум и водородная среда снижают температуру, необходимую для отжига РД в SiC. Механизм этого явления не может быть связан и с диффузией каких-либо примесей из атмосферы, так как время отжига составляло 15 мин (толщина образцов, напомним, была 350–400 мкм), и несомненно нуждается в дальнейшем исследовании.

В исследуемых образцах SiC содержится целый ряд РД, и, однако, спектры поглощения (см. рис. 1) имеют бесструктурный характер и не имеют пиков, которые можно приписать отдельным РД. На рис. 2 приведены зависимости коэффициента поглощения от температуры отжига для энергий фотонов $h\nu = 1.7, 2.0, 2.4$ эВ. Зависимости для других $h\nu$ имеют аналогичный характер.

Величины α для энергий фотонов, близких к ширине запрещенной зоны, при оценке концентрации РД не использовались, так как в спектре поглощения сильно облученных полупроводников наблюдается окологкраевая затяжка, связанная с мелкими РД [4]. Как видно из рис. 2, образцы облученного нейтронами SiC содержат две группы РД, отжигающихся соответственно при температурах до 700 °C и 900–1100 °C. Методом угловых коэффициентов [7] произведена оценка энергии активации отжига: для $T_a < 700$ °C она находится в пределах 0.5–1.5 эВ, а для $T_a > 900$ °C составляет ~ 3 эВ.

Для измерения концентрации электронов в образцах SiC, облученных нейтронами, использовался эффект Холла [8] (величина магнитного поля составляла $5.5 \cdot 10^3$ Гс), а для измерения удельного сопротивления — метод Ван-дер-Пау. Концентрация электронов после облучения составляла $\sim 2.6 \cdot 10^{10}$ см^{-3} (эта величина является оценочной, так как после нейтронного облучения электрическая однородность SiC нарушается скоплениями РД) и в процессе отжига восстанавливалась до исходной. Ход зависимости концентрации электронов n от температуры отжига в интервале 600–1100 °C (рис. 3) коррелирует с данными, полученными по оптическому поглощению. Оценка энергии активации отжига по данным $n(T_a)$ и $\rho(T_a)$ согласуется с данными, полученными

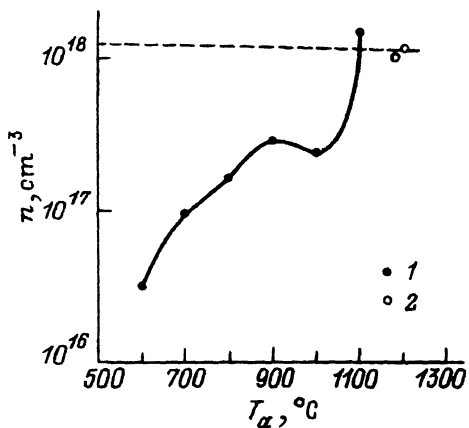


Рис. 3. Изменение концентрации электронов в результате отжига (1 и сплошная кривая). 2 — концентрация электронов до облучения SiC. Температура измерения — комнатная.

ми из исследования α (T_a). Полное восстановление исходной концентрации электронов происходит в результате отжига при 1100 °С. После отжига при 1100 °С энергия активации проводимости составляла ~ 0.03 эВ, что можно отнести к уровню азота [9] и связать с восстановлением этого уровня.

Как говорилось выше, облученный SiC содержит ряд глубоких уровней РД. Спектры фотопроводимости $\Delta\sigma$, приведенные к максимальному значению $\Delta\sigma_{\max}$, измеренные при температуре жидкого азота, не имеют четко выраженных пиков (рис. 4), которые можно припи-

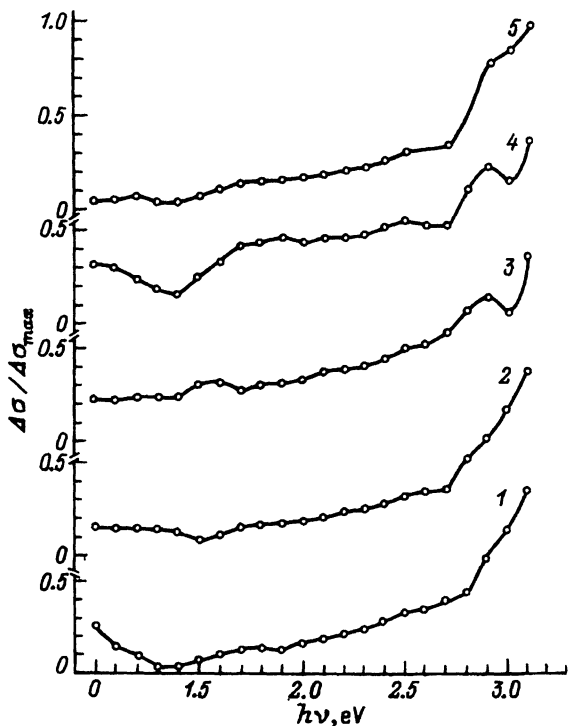


Рис. 4. Спектры фотопроводимости образцов SiC, облученных нейтронами, без отжига (1) и после отжига при T_a , °С: 2 — 700, 3 — 800, 4 — 900, 5 — 1000.

сать отдельному дефекту. Рост фотопроводимости в облученных нейтронами образцах SiC при энергиях ~ 2.9 эВ вблизи края запрещенной зоны подтверждает предположение [2] об образовании примесной зоны мелких РД, которая сливается с дном зоны проводимости.

Таким образом, показано, что в SiC наблюдаются две группы РД, в различной степени поддающиеся отжигу; энергии активации отжига составляют ~ 1 и ~ 3 эВ. Отжиг SiC, облученного нейтронами, следует проводить в вакууме, при этом температура отжига РД существенно снижается, концентрация электронов восстанавливается до исходной отжигом при температуре 1100°C .

Список литературы

- [1] В.А. Ильин, В.С. Балладович. *Первая национальная конференция «Дефекты в полупроводниках»* (С.-Петербург, 1992) с. 125.
- [2] В.И. Брудный, С.Е. Ерматов, М.А. Кривов, Б.Т. Толебоев. Изв. вузов СССР. Физика, **26**, 122 (1983).
- [3] А.И. Вейнгер, А.А. Лепнева, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.И. Соколов. ФТП, **18**, 2014 (1984).
- [4] И.Г. Атабаев, М.С. Саидов, Л.И. Хируненко, В.И. Шаховцов, В.К. Шинкаренко, Л.И. Шпинар, А. Юсупов. ФТП, **21**, 570 (1987).
- [5] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1, с. 47.
- [6] В.В. Макаров. *Тр. Ленинградского Политехнического института* (1980) вып. 371, с. 66.
- [7] А. Дамаск, Дж. Дикс. *Точечные дефекты в металлах* (М., Мир, 1966) с. 153.
- [8] Е.В. Кучис. *Методы исследования эффекта Холла* (М., Сов. радио, 1974).
- [9] С.И. Власкина, Ю.Н. Литвинов, С.В. Свечников, О.Т. Сергеев. В сб.: *Техника средств связи. Сер. Общетехническая*, вып. 5, 74 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

A Study of Annealing of Radiation-Induced Defects in *n*-SiC(6H) Exposed to Thermal Neutron Radiation

I.G. Atabaev, M.S. Saidov, T.M. Saliev, and Kh.A. Shamuratov

«Physics-Sun» Research-Industrial Association at the S.V. Starodubtzev Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of Uzbekistan, 700084, Tashkent, Uzbekistan