

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ *n-GaP*

С. К. НИКОГОСЯН, В. А. СААКЯН

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 5 мая 1985 г.)

Показано, что изохронный отжиг (до 850°С) облученных образцов *n-GaP* полностью не восстанавливает первоначальные значения теплопроводности и электросопротивления. Наблюдаются осцилляция теплопроводности и резкое увеличение электросопротивления, которые объясняются вторичным дефектообразованием и перестройкой локальных электронных уровней дефектов при отжиге.

Известные физические процессы, которые происходят в облученных материалах при термообработке, дают основание полагать, что термообработка в конце концов должна привести к восстановлению их первоначальных (до облучения) характеристик. Однако экспериментальные исследования, особенно последних лет, показывают, что такая общепринятая картина отжига не всегда реализуется в действительности. В реальных кристаллах существует много различных примесей и структурных несовершенств, часть которых дает локальные электронные уровни в запрещенной зоне полупроводника. При термообработке облученных образцов некоторая часть дефектов (радиационных и структурных) исчезает вовсе, а между остальными протекают квазихимические реакции с образованием новых (вторичных) дефектов, происходит перестройка существующих и возникновение новых локальных электронных уровней.

В настоящей работе эти процессы подробно исследуются путем измерения удельного электросопротивления и теплопроводности облученных образцов *n-GaP* в зависимости от температуры изохронного отжига.

1. Для измерения теплопроводности и удельного электросопротивления использовались монокристаллические образцы *n-GaP* с концентрацией свободных электронов $n_1 \approx 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (два образца) и $n_{II} \approx 3,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Температурная зависимость теплопроводности в окрестности азотной температуры измерялась на описанной в работе [1] установке, использующей стационарный тепловой поток. Ошибки измерения не превышали $\pm 5\%$. Удельное электросопротивление измерялось на отдельной установке на постоянном токе в интервале температур 100—300 К.

Образцы облучались на линейном ускорителе электронов с энергией 50 МэВ соответственно дозами $\Phi_I = 7,0 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ и $\Phi_{II} = 1,2 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$. Методика облучения образцов описана в работе [2]. На первых двух образцах (I) исследовалась температурная зависимость теплопроводности,

а на третьем (II) — удельное электросопротивление. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 1 и 2.

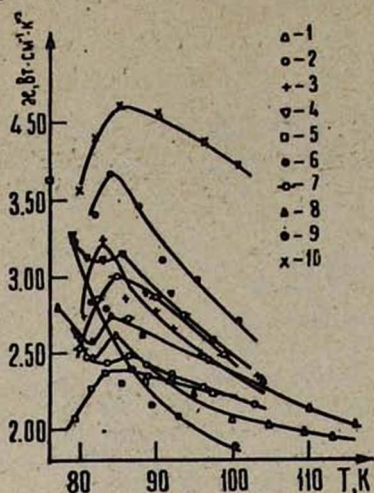


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности образцов n -GaP до и после облучения электронами с энергией 50 МэВ и дозой $7,0 \cdot 10^{17}$ эл/см²: 1 — после облучения; 2 — после отжига при температуре 100°С; 3 — 150°С; 4 — 200°С; 5 — 225°С; 6 — 280°С; 7 — 260°С; 8 — 400°С; 9 — 800°С; 10 — необлученный.

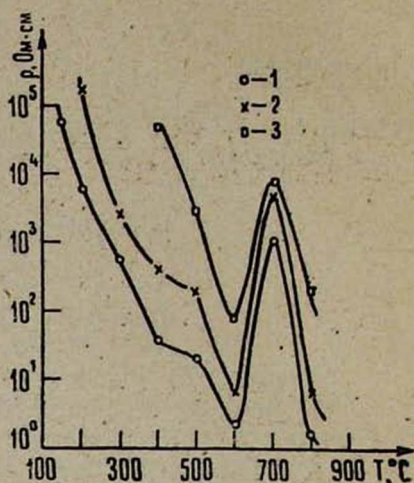


Рис. 2. Изменение удельного электросопротивления образца n -GaP, облученного электронами с энергией 50 МэВ и дозой $1,2 \cdot 10^{17}$ эл/см² в зависимости от температуры изохронного отжига: 1 — измерение проведено при $T = 300$ К; 2 — при $T = 200$ К; 3 — при $T = 125$ К.

Как следует из рис. 1, после облучения теплопроводность GaP n -типа при азотных температурах уменьшается почти на 30%. На кривой зависимости теплопроводности от температуры нет максимума, характерного для обычного хода, а наблюдается некоторый провал вблизи $T \approx 82$ К. Отжиг облученных образцов при $T = 100^\circ\text{С}$ незначительно изменяет теплопроводность; минимум на кривой еще заметен. Изохронный отжиг при $T = 150^\circ\text{С}$ приводит к общему увеличению теплопроводности и возникновению максимума при $T \approx 83$ К. После отжига при 200°С максимум теплопроводности исчезает. Снова наблюдается некоторый провал вблизи $T \approx 82$ К.

Значение теплопроводности резко падает после отжига при температуре 225°С . Максимум появляется вновь. Отжиг при 260°С приводит к увеличению теплопроводности. В интервале температур 79—90 К теплопроводность проявляет сильную температурную зависимость после изохронного отжига при 280°С .

Чтобы не очень загромождать рис. 1 далее на нем приведены данные после отжига при 400° и 800°С . Отметим, что в интервале температур отжига 400—800°С сильных колебаний в теплопроводности не наблюдается. Она растет более или менее монотонно с повышением температуры отжига. Как видно на рис. 1, даже отжиг при 800°С не восстанавливает начальное (до облучения) значение теплопроводности.

На кривых зависимости удельного электросопротивления облученных образцов n -GaP от температуры отжига (рис. 2) видно несколько стадий отжига. Но самое примечательное здесь то, что после термообработки при 700°C удельное сопротивление сильно возрастает, т. е. наблюдается отрицательный отжиг.

2. Экспериментальные данные по теплопроводности и удельному электросопротивлению показывают, что процесс отжига облученных образцов n -GaP носит весьма сложный характер. Например, из рис. 1 следует, что отжиг радиационных дефектов в n -GaP происходит в несколько стадий (они до конца не отжигаются даже при 800°C). Причем отжиг приводит не только к аннигиляции некоторой части имеющихся дефектов, но также к их перестройке, распаду (комплексов и сложных дефектов) или коагуляции (различных точечных дефектов) с образованием новых метастабильных состояний. Результаты наших экспериментов показывают, что при отжиге, помимо уничтожения дефектов, происходит новое дефектообразование. Весь этот процесс в очень сильной степени зависит как от примесного состава и структурного совершенства изучаемого кристалла, так и от интенсивности и энергии бомбардирующих частиц.

В литературе мы не нашли данных по теплопроводности монокристаллов GaP n -типа, облученных электронами с энергией 50 МэВ с последующим изохронным отжигом. В работах [3, 4] проведен отжиг образцов n -GaP, облученных электронами с энергией 1 МэВ. Обнаружены стадии отжига 160° , 250 — 300° и 500°C . Наблюдалось также ИК поглощение, обусловленное, по-видимому, присутствием междоузельного фосфора P_i или P_i -Ga_i-комплексом [4]. Эти дефекты отжигаются при $T = 260^\circ\text{C}$. Дефекты междоузельного типа, в состав которых входят углерод, азот, бор, отжигаются при $T \simeq 130^\circ$ и 260 — 290°C .

Если сравнить эти данные с нашими измерениями по теплопроводности, то можно видеть (рис. 1), что указанные стадии отжига наблюдаются и в нашем случае. Теплопроводность особенно сильно изменяется после отжига в температурном интервале 100 — 400°C .

Как следует из рис. 1, после облучения в температурной зависимости теплопроводности наблюдается некоторый провал вблизи $T \simeq 82\text{ K}$, что, по-видимому, связано с возникновением локальных мод. Появление максимума в теплопроводности вблизи $T \simeq 83\text{ K}$ после отжига при $T = 150^\circ\text{C}$ указывает на некоторую роль рассеяния фононов на связанных электронах [5]. Увеличение теплопроводности вблизи азотных температур после отжига при $T = 280^\circ\text{C}$, ее резкий спад в сторону высоких температур (в интервале температур 79 — 90 K) можно объяснить отжигом дефектов междоузельного типа, как это отмечено и в работе [4]. Крутой спад теплопроводности в сторону высоких температур также хорошо согласуется с высказанным в работе [6] предположением о том, что в некотором интервале температур более чистый образец может обладать меньшей теплопроводностью, чем грязный.

Вычисленная из экспериментальных данных по температурной зависимости удельного электросопротивления (после отжига при 700°C) энергия ионизации донорного уровня оказалась равной $E \simeq 0,24\text{ эВ}$. Сравнение этого результата с аналогичными оценками для температур отжига

600 и 800°С показывает, что после отжига при 700°С в образце возникает новый донорный электронный уровень с заметно большей энергией ионизации. Хотя из наших данных нельзя точно установить, какому именно дефекту принадлежит этот уровень, ясно одно, что он является результатом квазихимической реакции, стимулированной отжигом, между радиационными дефектами и донорными примесными атомами. И, как следует из рис. 2, при более высоких температурах отжига этот уровень исчезает и электросопротивление постепенно уменьшается. Наблюдается также замедление роста теплопроводности после отжига при 700°С, что тоже указывает на образование дефекта нового типа.

Отрицательный отжиг такого типа недавно наблюдался в работах [7, 8] на *GaAs* и *InSb*, облученных соответственно ионами серы с энергией 100 и 175 кэВ и электронами с энергией 3 МэВ. По мнению авторов работы [7] отрицательный отжиг электросопротивления обусловлен взаимным перекрытием разупорядоченных областей, возникающих в кристалле после ионной бомбардировки. В *InSb* [8] отрицательный отжиг связывается с дообразованием дефектов во время термообработки образцов, содержащих определенные примеси (*Cu*, *Fe*, *Ni*).

Резюмируя, можно сделать следующий вывод: осцилляция теплопроводности вблизи азотных температур облученных образцов *n-GaP* в зависимости от температуры изохронного отжига, а также сильное возрастание удельного электросопротивления после отжига при 700°С указывают на то, что отжиг дефектов является сложным процессом. При термообработке некоторая часть этих дефектов исчезает вовсе, а с остальными происходят квазихимические реакции, приводящие к образованию новых (вторичных) дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девяткова Е. Д. и др. ФТТ, 2, 738 (1960).
2. Амагуни К. М. и др. В кн. «Радиационные дефекты в твердых телах». Изд. Наукова думка, Киев, 1977, с. 125.
3. Брайловский Е. Ю. и др. ФТП, 9, 769 (1975).
4. Morlison S. R., Newman R. C. J. Phys., C6, 223 (1973).
5. Keyes R. W. Phys. Rev., 122, 1171 (1961).
6. Никогосян С. К. и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 18, 109 (1983).
7. Ардышев В. М. и др. ФТП, 18, 316 (1984).
8. Барамидзе Н. В. и др. Материалы Международной конференции по радиационной физике полупроводников и родственных материалов. Изд. Тбилисского государственного университета, Тбилиси, 1980, с. 748.

ՋԵՐՄԱՄԵՆԱԿԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀԱՌԱԳԱՅԹՎԱՍՏ *n-GaP* ՆՄՈՒՇՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՀԱՂՈՐԴԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՏԵՍԱԿԱՐԱՐ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Ս. Կ. ՆԻԿՈԳՈՅԱՆ, Վ. Հ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

Ուսումնասիրված է ջերմամշակման ազդեցությունը էլեկտրոններով ճառագայթված *n-GaP* մոնոքրիստալների սկզբնական (մինչ ճառագայթումը) բնութագրերի վերականգնման վրա: Ջերմահաղորդականության և տեսակարար էլեկտրադիմադրության չափման միջոցով ցույց է տրված, որ բարձրջերմաստիճանային ջերմամշակման ժամանակ տեղի են ունենում բավականին բարդ պրոցեսներ ճառագայթված *n-GaP* նմուշների հետ:

EFFECTS OF ANNEALING ON THE THERMAL CONDUCTIVITY AND SPECIFIC ELECTRIC RESISTANCE OF IRRADIATED SAMPLES OF $n\text{-GaP}$

S. K. NIKOGHOSYAN, V. A. SAHAKYAN

Measurements of thermal conductivity and specific electric resistance of $n\text{-GaP}$ samples irradiated with 50 MeV electrons show that at some values of isochronous annealing temperature these parameters vary "anomalously". With the increase in annealing temperature (beginning from 100° C) the thermal conductivity coefficient oscillates near the nitrogen temperatures, while the specific electric resistance, varying more or less monotonously, abruptly increases after the annealing at 700° C. Initial values of these quantities do not recover even after the annealing at 850° C. The phenomena observed are explained as due to the secondary defect formation and rearrangement of local electron levels of defects at isochronous annealing.