

К. ф.-м. н. А. Ю. БОНЧИК, к. ф.-м. н. И. И. ИЖНИН,  
д. ф.-м. н. С. Г. КИЯК, к. ф.-м. н. Г. В. САВИЦКИЙ

Украина, г. Львов, ИППММ НАНУ, НПП "Карат"  
E-mail: surface@iapmm.lviv.ua; granat@ipm.lviv.ua

Дата поступления в редакцию  
23.07 2004 г.

Оппонент д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ  
(Центр оптоэлектронных технологий, г. Киев)

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ФОТОННОГО ОТЖИГА НА ПАРАМЕТРЫ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ СЛОЕВ $n$ -GaAs:Si

*Показана возможность получения слоев  $n$ -GaAs на полуизолирующем GaAs толщиной 0,1—0,3 мкм с концентрацией электронов  $10^{17}$ — $10^{18}$  см $^{-3}$  и подвижностью 2000—3000 см $^2$ /(В·с).*

Ионная имплантация является одним из основных методов формирования локальных легированных областей в микроэлектронных приборах на основе GaAs-и GaAs-структур для изготовления приборов микроэлектроники, например СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки [1, 2]. Прежде всего это связано с трудностями диффузионного легирования этого материала, особенно донорными примесями с высокой концентрацией ( $>10^{18}$  см $^{-3}$ ), без значительного ухудшения кристаллической структуры материала.

Несмотря на то, что ионное легирование арсенида галлия начало развиваться уже более 30 лет, в каждом конкретном случае для получения заданных параметров требуется проведение целенаправленных технологических и исследовательских работ по выбору режимов ионной имплантации примеси и, особенно, методов и режимов послеимплантационного отжига. Последнее обстоятельство создает дополнительные трудности и приводит к дополнительному усложнению технологии ионного легирования в связи с тем, что при высоких температурах отжига происходит разложение материала за счет испарения As с поверхности, и требуется защита поверхности при обычном термическом отжиге.

Значительные преимущества в этом плане дает импульсный фотонный отжиг [3]. Сравнительный анализ обычного и фотонного отжига, а также использование фотонного отжига в имплантированном кремнием полуизолирующем GaAs для создания СВЧ полевых транзисторов и интегральных микросхем было проведено в [4, 5]. В частности, там отмечается высокая активность введенных ионов Si при использовании фотонного отжига.

Целью работы была отработка технологических режимов ионного легирования ионами Si и режимов послеимплантационного некогерентного импульсного фотонного отжига для получения слоев  $n$ -GaAs на полуизолирующем GaAs толщиной 0,1—0,3 мкм с концентрацией электронов  $10^{17}$ — $10^{18}$  см $^{-3}$  и подвижностью 2000—3000 см $^2$ /(В·с).

### Эксперимент

Ионное легирование ионами Si $^+$  проводилось на ионно-лучевой установке МРВ-202 фирмы «Balzers».

Для получения ионов Si $^+$  в ионном источнике использовалось соединение SiF $_4$ . Анализ спектров ионов данного соединения, полученных с помощью масс-спектрографа, свидетельствовал об отсутствии пиков посторонних ионов на выходе ионного сепаратора.

Ионная имплантация проводилась при энергии ионов 100 кэВ при комнатной температуре и нормальном падении пучка ионов на поверхность подложки и флюенсах ионов  $3 \cdot 10^{13}$ ,  $10^{14}$  и  $5 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ . Контроль флюенса ионов осуществлялся встроенным интегратором с точностью не хуже 0,02%. В качестве подложек были использованы полуизолирующие пластины GaAs типа АГЧП-1 с ориентацией (100) и удельным сопротивлением  $\geq 10^7$  Ом·см производства ОАО «Чистые металлы» (г. Светловодск).

Для активации имплантированных ионов и отжига радиационных дефектов использовали некогерентный импульсный фотонный отжиг, для чего использовалась модернизированная установка фотонного отжига «Оникс», описанная в [6]. Компьютерное управление установкой позволяло с высокой точностью воспроизводить задаваемые температурно-временные диаграммы отжига имплантированных структур при характерных значениях времени отжига до 100 с и температурах отжига до 1000°C с визуальным контролем временного хода задания и реальной температуры держателя на экране дисплея. Отжиг проводился в защитной проточной атмосфере азота.

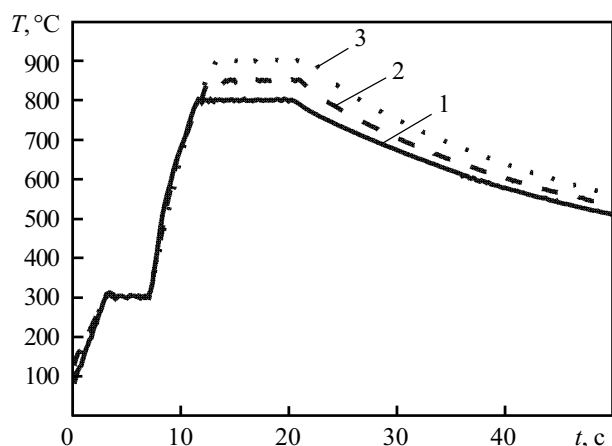


Рис. 1. Температурно-временные диаграммы фотонного отжига ионно-имплантированных структур GaAs при длительности отжига 10 с:

1 —  $T=800^\circ\text{C}$ ; 2 —  $T=850^\circ\text{C}$ ; 3 —  $T=900^\circ\text{C}$

Для исследования влияния режимов отжига (температура и длительность) на параметры имплантированных слоев (концентрацию и подвижность носителей, толщину имплантированного слоя) из имплантированной при каждом флюенсе пластины было выколото по 9 образцов размерами примерно 8×8 мм для проведения холловских измерений. Отжиг проводили при температурах 800, 850 и 900°С и длительности отжига 5 и 10 с для каждой температуры. (На рис. 1 приведен пример температурно-временной диаграммы отжига при длительности 10 с.) Параллельно с этими образцами отжигались также образцы для исследования толщины имплантированного слоя и профиля распределения концентрации носителей.

После отжига на каждый холловский образец нанесли микропаяльником контакты из сплава In+5%Te, которые затем отжигали при температуре 400°С в течение 1 мин в атмосфере азота.

Концентрация и подвижность носителей определялись из результатов холловских измерений. Измерения проводили по стандартной методике на постоянном токе в магнитном поле 1 Тл в конфигурации Ван-дер-Пау при комнатной температуре на модернизированной установке «Холл-200» [7].

**Результаты и обсуждение**

При импульсном некогерентном фотонном отжиге образец прогревается на всю толщину, вследствие чего процесс отжига происходит в твердой фазе. По сравнению с обычным термическим отжигом процесс перестройки дефектной структуры проходит значительно быстрее (порядка десятка секунд), и поэтому фотонный отжиг не сопровождается значительным диффузным размыванием профиля имплантированной примеси, и самое главное, вызывает значительно меньшее разложение поверхности материала.

Результаты исследований различных условий отжига на свойства имплантированных Si слоев n-GaAs приведены в таблице, где

*Параметры ионно-имплантированных структур после фотонного отжига*

$\Phi$ , см <sup>-2</sup>	$T_{отж}$ , °С	$t_{отж}$ , с	Номер образца	$n_s$ , см <sup>-2</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /(В·с)
10 <sup>14</sup>	800	5	AG1-800-5	1,43·10 <sup>13</sup>	2040
	850	5	AG1-850-5	1,91·10 <sup>13</sup>	1980
	900	5	AG1-900-5	2,36·10 <sup>13</sup>	1800
10 <sup>14</sup>	800	10	AG1-800-10	1,7·10 <sup>13</sup>	1940
	850	10	AG1-850-10	2,02·10 <sup>13</sup>	1840
	900	10	AG1-900-10	2,29·10 <sup>13</sup>	1700
5·10 <sup>14</sup>	800	5	AG2-800-5	1,13·10 <sup>13</sup>	2090
	850	5	AG2-850-5	1,43·10 <sup>13</sup>	2030
	900	5	AG2-900-5	1,57·10 <sup>13</sup>	2010
5·10 <sup>14</sup>	800	10	AG2-800-10	1,22·10 <sup>13</sup>	2150
	850	10	AG2-850-10	1,48·10 <sup>13</sup>	2050
	900	10	AG2-900-10	1,64·10 <sup>13</sup>	1930
3·10 <sup>13</sup>	850	5	AG3-850-5	5,37·10 <sup>12</sup>	1450
	900	5	AG3-900-5	9,87·10 <sup>12</sup>	1800
3·10 <sup>13</sup>	800	10	AG3-800-10	4,72·10 <sup>12</sup>	1920
	850	10	AG3-850-10	7,34·10 <sup>12</sup>	1780
	900	10	AG3-900-10	1,3·10 <sup>13</sup>	1520

- $\Phi$  — флюенс внедренных ионов;
- $T_{отж}$  — температура отжига;
- $t_{отж}$  — длительность отжига;
- $n_s$  — слоевая холловская концентрация электронов,
- $n_s = d/(e \cdot R_H)$ ;
- $d$  — эффективная толщина имплантированного слоя;
- $e$  — заряд электрона;
- $R_H$  — коэффициент Холла;
- $\mu$  — подвижность электронов.

Для анализа полученных результатов введем величину коэффициента активности внедренных ионов  $a = n_s / \Phi$  [5], которая не учитывает влияния обедненных слоев у поверхности и границы раздела "имплантированный слой—подложка".

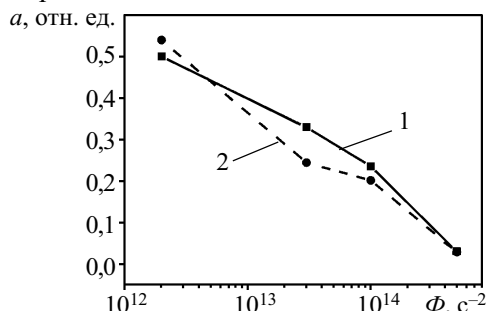


Рис. 2. Зависимость активности ионов от флюенса для имплантированных Si слоев GaAs при режимах отжига  $T=900^\circ\text{C}$ ,  $t=5$  с (1) и  $T=850^\circ\text{C}$ ,  $t=10$  с (2)

На рис. 2 приведены зависимости активности ионов от флюенса для двух режимов отжига. (Значения для  $\Phi=2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> взяты из работы [5].) Как видно, в каждом случае наблюдается сильное уменьшение активности при возрастании флюенса ионов.

**Выводы**

Исследования показали возможность получения с помощью фотонного отжига имплантированных ионами Si слоев n-GaAs с толщиной 0,1—0,3 мкм, концентрацией электронов 10<sup>17</sup>—10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup> и подвижностью 2000—3000 см<sup>2</sup>/(В·с).

Отмечается сильная зависимость активности имплантированных ионов от флюенса ионов.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнепрука, У. Уиссмана.— М.: Мир, 1988.
2. Hunsperger R. G., Hirsch N. GaAs field-effect transistors with ion implanted channels // Electron. Lett.— 1973.— Vol. 9, N 25.— P. 577—578.
3. Готра З. Ю., Осередько С. А., Бобицкий Я. В. Импульсный лазерный отжиг ионно-имплантированных полупроводниковых материалов // Зарубежная электронная техника.— 1983.— № 6.— С. 3—48.
4. Tamura A., Uenoyama T., Nishii K. et al. New rapid thermal annealing for GaAs digital integrated circuits // J. Appl. Phys.— 1987.— Vol. 62, N 3.— P. 1102—1107.
5. Crist J. O., Look D. C. Activation efficiencies for a standard qualification implant in GaAs annealed by a rapid thermal process // J. Electron. Mater.— 1990.— Vol. 19, N 8.— P. 773—776.
6. Савицкий Г. В., Бончик А. Ю., Ижнин И. И. и др. Модернизация установки фотонного отжига полупроводниковых пластин "Оникс" // "Технология и конструирование в электронной аппаратуре".— 2002.— № 6.— С. 45—47.
7. Бончик О. Ю., Іжнін І. І., Кияк С. Г. та ін. Автоматизований комплекс для дослідження електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів // Зб. наук. праць Фіз.-механіч. ін-ту ім. Г. В. Карпенка. Сер. "Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів".— 2002.— Вип. 7.— С. 235—240.