

# АКТИВАЦИЯ ИОНОВ Si В GaAs ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ As

Ю.А.Бумай<sup>1)</sup>, К.С.Горула<sup>1)</sup>, А.Н.Акимов<sup>2)</sup>, Л.А.Власукова<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусская государственная политехническая академия, Беларусь, 220027, г.Минск, пр.Ф.Скорины, 65, тел. 232 77 85

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, Беларусь, 220050, г.Минск, пр.Ф.Скорины 4, тел. 278 70 97

В имплантированный кремнием GaAs была дополнительно проведена высокоинтенсивная имплантация ионов мышьяка. Методами эффекта Холла и обратного резерфордовского рассеяния каналированных ионов исследованы электрические и структурные свойства имплантированных слоев после термического отжига. Показано, что непосредственно после имплантации As в самоотжиге образуются проводящие слои с низкой активацией. Последующий термический отжиг приводит к эффективности активации Si, близкой к 100%. Обсуждается механизм наблюдаемого явления.

## I. Введение

Электрическую активность Si, имплантированного в GaAs, можно повысить дополнительной имплантацией в GaAs изовалентной примеси [1-4]. Повышение температуры имплантации или отжиг радиационных повреждений в ходе облучения ионными пучками высокой плотности также позволяет повысить электрическую активность примеси и снизить уровень радиационных дефектов в GaAs [5]. В данной работе исследована возможность повышения активации Si как амфотерной примеси в GaAs сочетанием имплантации активной и изовалентной примесей с использованием самоотжиговых режимов имплантации.

## II. Эксперимент

Пластина полуизолирующего GaAs (100) толщиной 345 мкм была имплантирована ионами Si с энергией 100 кэВ и дозой  $2 \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре. На серии образцов, вырезанных из данной пластины, выполнена имплантация ионов As с энергией 150 кэВ и плотностью тока 80 мкА/см<sup>2</sup>. Продолжительность имплантации мышьяка изменялась с шагом в 2 с от 2 до 20 с. Доза ионов As для 20 с имплантации составила  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Образцы находились в тесном тепловом контакте с металлическим держателем.

Часть образцов (исходных и после двойной имплантации) отжигалась в печи под порошком GaAs, насыщенном As, в токе водорода при температуре 750 °С в течение 20 мин.

Электрические параметры имплантированных слоев определялись методом эффекта Холла в интервале температур 77-300 К. Структура облученных слоев исследовалась методом обратного резерфордовского рассеяния каналированных ионов гелия с энергией 2 МэВ. Обратнорассеянные ионы регистрировались под углом  $\theta = 170^\circ$ .

## III. Результаты и обсуждение

Температура нагрева образца при имплантации As оценивалась из численного решения уравнения теплового баланса с учетом потери энергии образцом во время нагрева ионным пучком за счет теплового излучения с верхней поверхности образца, а также передачи тепла от образца в держатель:

где  $C(T)$  - теплоемкость и  $\rho$  - плотность GaAs [6],  $l$  - толщина образца,  $J$  - плотность тока ионов As,  $U$  - энергия ионов,  $\varepsilon$  - излучательная способность GaAs,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $T_o$  - температура окружающей среды,  $V$  - коэффициент теплопередачи от образца к держателю. Излучательная способность  $\varepsilon \approx 1-R$  выбрана равной 0.7 исходя из значения коэффициента отражения для длины волны максимума спектральной светимости GaAs при 700 °С ( $\lambda_{\max} \sim 3$  мкм).

Оценка температуры проводилась по моменту покраснения образца в ходе нагрева ионным пучком As (через ~7 с после начала имплантации) путем подбора коэффициента  $V$ . Как показали предварительные наблюдения, начиная с температур 550 – 600 °С покраснение образцов наблюдается визуально.

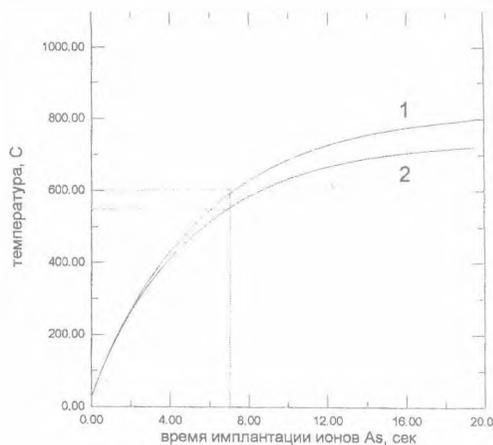


Рис.1. Температура образцов как функция времени имплантации ионов As. Кривые 1-  $V = 0.008$  Вт / см<sup>2</sup> К, 2-  $0.011$  Вт / см<sup>2</sup> К.

На рис.1 приведена зависимость температуры образцов от времени имплантации ионов As, рассчитанная из (1). Из рисунка видно, что для времени имплантации свыше 7 с максимальная температура образцов находится в интервале 700 – 800 °С.

Для ряда образцов при временах облучения свыше 8 с ( $T > 600$  °С) температура поверхности GaAs с выделением

и Ga. Поскольку данный эффект не зависит от времени облучения, можно предположить, что разложение GaAs носит случайный характер и вызвано наличием на поверхности образцов микроскопических дефектов, ускоряющих испарение As, или неоднородностью ионного пучка.

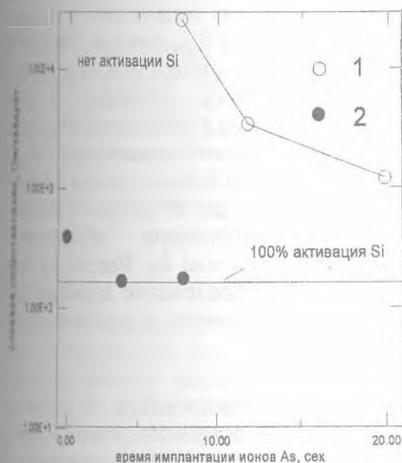


Рис.2 Зависимость слоевого сопротивления имплантированного кремнием GaAs от времени последующей имплантации As: 1 – после имплантации As, 2 - после имплантации As и отжига при 750°C в течение 20 мин.

На рис.2 показана зависимость слоевого сопротивления GaAs непосредственно после имплантации As (светлые символы). Из рис. 2 видно, что активация наступает только после отжига ионным пучком более 6 с ( $T > 500^\circ\text{C}$ , рис.1) и увеличивается с длительностью обработки от 0.5 до 7%. При этом подвижность составляет  $\sim 2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  и образцы характеризуются высокой неоднородностью сопротивления (большой разброс потенциалности контактов при измерениях методом Ван дер Пау). Такой результат можно объяснить наличием большого количества компенсирующих радиационных дефектов, в том числе и макроскопических, и их неоднородным распределением. Для времени имплантации As до 8 с слоевое сопротивление образцов соответствует сопротивлению полуизолирующего GaAs ( $> 10^9 \text{ Ом}/\square$ ).

На рис.3 представлен спектр деканализированных ионов He от образца GaAs после 8 с имплантации As (образец характеризуется наличием активации Si). Для образца после 6 с имплантации As, в котором активация Si не наблюдалась, вид спектра является аналогичным (на рисунке не показан).

Из спектров обратного резерфордовского рассеяния следует, что как для образца с активацией Si, так и для неактивированного образца кристаллическая структура имплантированных слоев полностью восстановилась, несмотря на большие дозы ионов As.

После высокоинтенсивной имплантации As образцы, в которых наблюдалась активация (8 с обработки ионами As) и образцы, в которых активация не наблюдалась (4 с обработки ионами As) были отожжены в печи под слоем порошка GaAs,

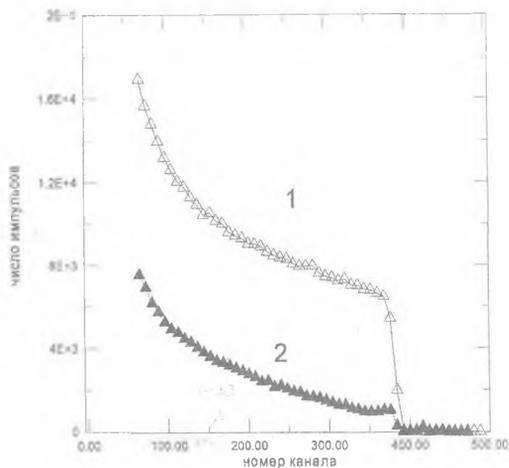


Рис.3.Спектр деканализированных ионов He (2 МэВ, 170°) от образца GaAs после 8 с имплантации As (наличие активации Si): 1-спектр неориентированного кристалла, 2- спектр кристалла в режиме каналирования.

насыщенного As, при температуре 750°C в течение 20 мин. После отжига образцы характеризовались активацией, близкой к 100%, и подвижность  $\sim 2100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  (рис.2, черные символы). Усредненная концентрация электронов в этом случае составляет  $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Из измерений температурных зависимостей подвижности и слоевого сопротивления образцов после имплантации As в течении 4 и 8 с и последующего термического отжига следует, что холловская подвижность электронов в температурном интервале 77-300 К изменяется слабо, что свидетельствует о доминирующем рассеянии свободных носителей заряда на ионизированных центрах. Низкие значения подвижности для указанной выше концентрации электронов свидетельствуют о наличии в образце рассеивающих центров связанных с остаточными радиационными дефектами.

Таким образом, из полученных результатов следует:

- высокоинтенсивная имплантация As в самоотжиговом режиме в GaAs, имплантированный Si, приводит к появлению проводящих слоев с низкой активацией;
- последующий печной отжиг образцов после высокоинтенсивной имплантации As позволяет увеличить активацию Si до 100% т.е. практически в два раза по сравнению с образцами, имплантированными только Si.

Столь высокий уровень активации Si в GaAs при двойной имплантации, как и резкое увеличение активации при высокоинтенсивной имплантации примеси As, наблюдается впервые. Увеличение активации Si в GaAs при совместной имплантации наблюдалось ранее только при использовании изовалентной примеси фосфора. Согласно [7] имплантация изовалентных примесей As и N приводит к уменьшению активации Si в GaAs, а имплантация As приводит к увеличению активации Si в GaAs. Большое количество радиационных дефектов

ний, для устранения которых требуется высоко-температурный отжиг. Повышение активации Si при имплантации P связывают с меньшей массой ионов P по сравнению с ионами As, т.е. меньшим количеством радиационных нарушений в GaAs при совместной имплантации.

Из работ посвященных совместной имплантации электрически активной (Si) и изовалентной примеси (в основном, P) следует, что эффективность активации Si при этом увеличивается в 1.5 - 2 раза [1,3,7]. Для GaAs имплантированного Si ( $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) и P после отжига при  $800^\circ\text{C}$  под пленкой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  эффективность активации увеличилась от 24% до 36% в сравнении с образцами, имплантированными только Si [7]. В работе [1] показано, что совместная имплантация Si в интервале доз  $(2-3) \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и P ( $1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) после отжига при  $800^\circ\text{C}$  обеспечила активацию 72%, в сравнении с активацией 40% при имплантации только одного Si. Следует отметить, что повышение активации Si в случае совместной имплантации с P наблюдалось лишь для доз Si в интервале  $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и при температурах быстрого термического отжига не выше  $1050^\circ\text{C}$ .

В нашем случае, очевидно, высокоинтенсивная имплантация As привела к изменению направленности примесно-дефектных реакций с участием легирующей примеси Si, имплантируемой примеси As и собственных структурных дефектов вакансионного и междоузельного типов. На начальной стадии самоотжиговой имплантации As возможно образование аморфного слоя, а впоследствии - его эпитаксиальная рекристаллизация, отжиг двойников и дефектов упаковки. Из рис. 1 видно что температура твердофазной эпитаксиальной рекристаллизации ( $100 - 350^\circ\text{C}$ ) достигается уже при имплантации As в течение 2 с. Однако, имплантированные слои должны содержать большое количество радиационных дефектов, исходя из недостаточно высокой температуры высокоинтенсивной имплантации ( $700 - 800^\circ\text{C}$ ), малых времен отжига ( $< 20 \text{ с}$ ) и больших доз тяжелого элемента As, что является причиной низкой активации Si непосредственно после высокоинтенсивной имплантации. Вместе с тем, внедрение высокой дозы As изменяет сте-

хиометрию поверхности GaAs в сторону избытка As. Это приводит к появлению большого количества междоузельных атомов As, подвижных при температурах высокоинтенсивной имплантации и последующего термического отжига. Следствием этого является уменьшение концентрации вакансий мышьяка  $V_{\text{As}}$ , а также антиструктурных дефектов GaAs (глубоких акцепторов) и преимущественное образование  $\text{Si}_{\text{Ga}}$  доноров. Часть атомов Si сразу после имплантации или на промежуточных стадиях отжига попадает в As-вую подрешетку. Одной из реакций является, вероятно, связанный с высокой температурой образцов при высокоинтенсивной имплантации выход Si из As-вой подрешетки (где Si являемся мелким акцептором) и заполнение образовавшейся вакансии междоузельным As. Вероятной является также реакция образования антиструктурного дефекта  $\text{As}_{\text{Ga}}$ , связанного с глубоким донором EL2.

#### IV. Заключение

Исследованы электрические и структурные свойства имплантированного ионами кремния GaAs после дополнительной высокоинтенсивной имплантации ионов As и термического отжига. Показано, что высокоинтенсивная имплантация As в GaAs в режиме, не разрушающем поверхность, приводит после традиционного термического отжига к повышению эффективности активации Si, имплантированного в GaAs, до уровня 100%.

#### Список литературы

1. Fan W.D., Wang W.Y. // Nucl. Instrum. and Meth. - 1991. - B59/60. - P.1086.
2. Morrow R.A. // J. Appl. Phys. - 1988. - V.64, N4, P.1889.
3. Абрамов В.С., Акимченко И.П., Дравин В.А., Дымова Н.Н., Краснопецев В.В., Чалдышев В.В., Шмарцев Ю.В. // ФТП. - 1991. - Т.25, вып.8, С.1355.
4. Питуримова Е.А., Данилов Ю.А., Хохлов А.Ф. // Поверхность. - 1997. - №2, С.127.
5. Вавилов В.С., Ташлыков И.С. // Обзоры по электронной технике, сер.2 «Полупроводниковые приборы» - 1991. - №2.
6. Meyer J.R., Kruer M.R., Bartoli F.J. // J. Appl. Phys. - 1981. - V.51, N10, P.5513.
7. Hyaga F., Yamazaki H., Watanabe K., Osaka J. // Appl. Phys. Lett. - 1987. - V.50, N22, P.1592.

## ACTIVATION OF SI IMPLANTED IN GaAs AT HIGH INTENSITY As COIMPLANTATION

Yu.A. Bumai<sup>1)</sup>, K.S. Gorupa<sup>1)</sup>, A.N. Akimov<sup>2)</sup>, L.G. Vlasukova<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarussian State Polytechnic Academy, 65 F. Skaryna Ave., 220027 Minsk, Belarus, tel. 232 77 85

<sup>2)</sup>Belarussian State University, 4 F. Skaryna Ave., 220050 Minsk, Belarus, tel. 278 70 97

The electrical and structural properties of Si-implanted GaAs (with ion energies of 100 keV and dose of  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ) after high intensity coimplantation of As ions (with ion energies of 150 keV, current density of  $80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  and implantation times up to 20 s) and following furnace annealing have been investigated. It was obtained that As coimplantation in self-annealing regime produces the conductive layers with poor Si activation efficiency of ( $< 10\%$ ). The temperature during self-annealing As coimplantation (for the times above 7 s) was estimated using heat balance equation to be in the range of  $700 - 800^\circ\text{C}$ . RBS measurements showed the full recovery of crystalline structure of the implanted layers both with and without Si activation.

The following furnace annealing ( $750^\circ\text{C}$  for 20 min under As saturated GaAs powder) has enhanced Si activation efficiency up to 100%. The Hall mobility of the samples ( $\sim 2100 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ) is defined mainly by ionized Si concentration, which is slightly in 77-300 K range. The observed effect of Si activation efficiency enhancement is ascribed to the presence of As excess in the samples high temperatures during coimplantation. We suppose that presence of As which are mobile at high temperatures of high intensity implantation and furnace annealing.