

Поверхностное геттерирование фоновых примесей и дефектов в пластинах GaAs

© Л.С. Власенко, А.Т. Гореленок, В.В. Емцев, А.В. Каманин[†], Д.С. Полоскин, Н.М. Шмидт

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 3 августа 2000 г. Принята к печати 3 августа 2000 г.)

Приведены первые результаты по поверхностному геттерированию фоновых примесей и дефектов из объема нелегированных монокристаллических пластин GaAs с ориентацией (111), толщиной 1.6 мм, с исходной концентрацией $(1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью при комнатной температуре $1500-2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Пластины были получены из монокристаллов, выращенных методом Чохральского из расплава Ga-As, нестехиометрического состава, с избытком As. Геттерирование осуществлялось в процессе термообработки с осажденным на поверхность пластин слоем иттрия или SiO_2 толщиной 1000 \AA в атмосфере водорода при температурах $400-850^\circ\text{C}$. После геттерирования концентрация носителей уменьшилась до $10^8-10^{10} \text{ см}^{-3}$, а подвижность возросла до $7000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

1. Введение

Для улучшения характеристик силовых приборов, детекторов рентгеновского и гамма-излучения, а также элементарных частиц (в частности, нейтрино) необходимо получение пластин GaAs толщиной от 0.5 мм до нескольких миллиметров с низкой концентрацией носителей, ниже 10^{10} см^{-3} , и их достаточно однородным распределением по толщине пластины, а также с шириной области объемного заряда более 100 мкм и высокой подвижностью носителей заряда.

Обычно эта задача решается путем снижения концентрации фоновых примесей за счет использования сверхчистого оборудования и исходных материалов: Ga и As (чистотой 99.99999), что значительно удорожает процесс, и, кроме того, не гарантирует однородного распределения концентрации носителей заряда по глубине слитка и воспроизводимости результатов по определению концентрации от процесса к процессу. В [1] было показано, что невоспроизводимость и неоднородное распределение концентрации носителей по толщине пластины при концентрации мелких фоновых примесей ниже 10^{15} см^{-3} обусловлены влиянием собственных дефектов на результаты определения концентрации из электрических и оптических свойств полупроводника. Контроль за процессами генерации, рекомбинации и аннигиляции собственных дефектов позволяет улучшить воспроизводимость результатов. При этом удается снизить концентрацию до $(2-6) \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ при подвижности $6500-7000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [2].

В данной работе рассмотрен другой путь решения задачи получения чистого материала, основанный на использовании поверхностного геттерирования [3-5] для получения объемных материалов с заданными свойствами. К преимуществам этого метода следует отнести как низкую стоимость используемых материалов, так и низкую стоимость самого метода.

В настоящей работе обсуждаются первые успешные результаты по поверхностному геттерированию фоновых примесей иттрием в пластинах GaAs.

2. Эксперимент

Исходные нелегированные монокристаллы GaAs с ориентацией (111) были выращены методом Чохральского из расплава Ga-As, нестехиометрического состава, с избытком As. Слиток был нарезан на пластины, толщина которых после полировки составляла 1.6 мм. Измеренные методом Ван-дер-Пау (Van der Pauw) концентрация и подвижность носителей составляли $(1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $1500-2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при комнатной температуре.

Пластины покрывались с обеих сторон либо пиролитическим SiO_2 , либо термически напыленной в вакууме пленкой иттрия. Толщина осажденной пленки составляла в обоих случаях 1000 \AA . Затем пластины подвергались тепловой обработке (ТО) в атмосфере водорода при температуре $400-850^\circ\text{C}$ в течение 0-5 ч; после чего пленки SiO_2 и Y удалялись соответственно в HF и HNO_3 .

Распределение носителей по глубине определялось C-V-методом с использованием ртутного зонда Шоттки в сочетании с послойным химическим травлением. Температурные зависимости концентрации, подвижности носителей и проводимости определялись из измерений эффекта Холла в геометрии Ван-дер-Пау. Кроме того, были проведены исследования микроволновой фотопроводимости. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при исследовании чистых кристаллов кремния. В частности, метод позволил определить спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) рекомбинационных центров с низкой концентрацией $10^{10}-10^{12} \text{ см}^{-3}$ [6-8], т. е. чувствительность метода оказалась на 4 порядка выше, чем при использовании обычного ЭПР метода.

Эксперименты по регистрации микроволновой фотопроводимости образцов проводились с помощью ЭПР спектрометра, работающего на частоте 9 ГГц в температурном диапазоне 3-150 К. Образцы помещались в

[†] Факс: (812) 247 1017

E-mail: kamanin@ffm.ioffe.rssi.ru

резонатор спектрометра и облучались светом галогенной лампы накаливания мощностью 100 Вт. Величина Q -фактора резонатора ЭПР спектрометра зависела от проводимости образца. В экспериментах регистрировалось изменение напряжения на микроволновом детекторе, пропорциональное Q -фактору резонатора на частоте 80 Гц при 100%-ой модуляции интенсивности света. Сигналы микроволновой фотопроводимости регистрировались при различных температурах, а также при сканировании магнитного поля.

3. Результаты

На первом этапе работы был определен температурно-временной режим, который позволял снизить концентрацию носителей и получить их однородное распределение по глубине. При выборе режима исходили из имеющихся в литературе данных по термообработкам GaAs [9–12]. Опубликованные данные по поведению и параметрам электрически активных центров, возникающих после ТО, нередко противоречивы. Однако все авторы наблюдали изменение параметров и концентрации электрически активных центров в GaAs, в частности центра $EL2$ при температурах 800–850°C.

Сравнительные исследования пластин GaAs, покрытых SiO_2 и Y, после ТО показали, что изменения концентрации носителей на той и на другой структурах начинаются при 700°C. Причем формируется приповерхностная область толщиной 50–100 мкм, p -типа проводимости, с концентрацией $p \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Пик краевой фотолюминесценции наблюдался при $h\nu = 1.48 - 1.49 \text{ эВ}$ (77 К).

Для пластин, покрытых SiO_2 , на глубине более 100 мкм наблюдалась высокая степень компенсации. Увеличение времени и температуры ТО принципиально не изменяло картину. Распределение носителей по глубине было неоднородным и наблюдались области как n -, так и p -типа проводимости с концентрацией носителей $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

На пластинах GaAs, покрытых иттрием, после ТО при 800°C концентрация носителей на глубине более 100 мкм составляла $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$. При увеличении длительности ТО до 30 мин и более концентрация носителей существенно снижалась — до 10^8 см^{-3} и наблюдался n -тип проводимости, причем тип проводимости и значение концентрации сохранялись по всей толщине пластины $\sim 1500 \text{ мкм}$.

Образцы с концентрацией электронов менее 10^{11} см^{-3} и ее однородное распределение по толщине пластин были исследованы методами Ван-дер-Пау и микроволновой фотопроводимости. Температурная зависимость концентрации электронов представлена на рис. 1 для исходного GaAs (кривая 1) и для GaAs, покрытого иттрием, после ТО в течение 5 ч (кривая 2). Первая зависимость представлена на рис. 2 в другом масштабе. Подвижность при комнатной температуре для исходного GaAs составляла $1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

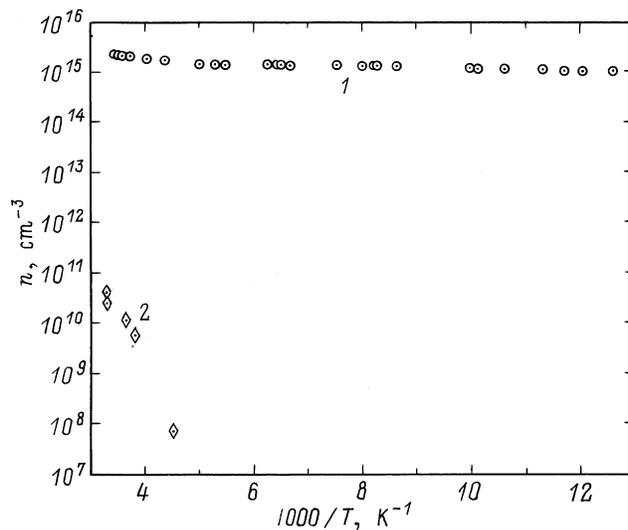


Рис. 1. Температурные зависимости концентрации электронов в пластинах GaAs: 1 — исходной и 2 — покрытой иттрием и подвергнутой термообработке в течение 5 ч при 800°C.

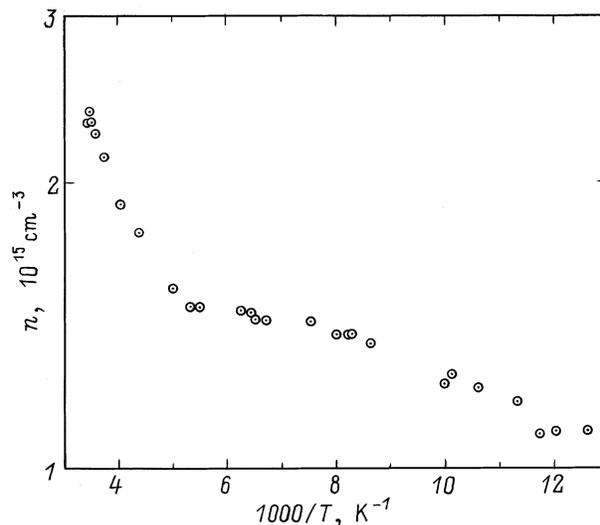


Рис. 2. Температурная зависимость концентрации электронов в исходной пластине GaAs.

Анализ температурной зависимости показал, что концентрация носителей $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре в исходном GaAs определялась мелким донорным уровнем с энергией активации 10–12 мэВ и глубоким донорным уровнем с энергией активации $\sim 150 \text{ мэВ}$. При этом степень компенсации составляла 40%, а концентрация акцепторов — 10^{15} см^{-3} . После ТО в течение 5 ч при температуре 800°C таких пластин, покрытых иттрием, наблюдается уменьшение степени компенсации до 30% и увеличение подвижности до $7000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Для такого материала температурная зависимость концентрации определяется только донорным уровнем с энергией активации 430 мэВ.

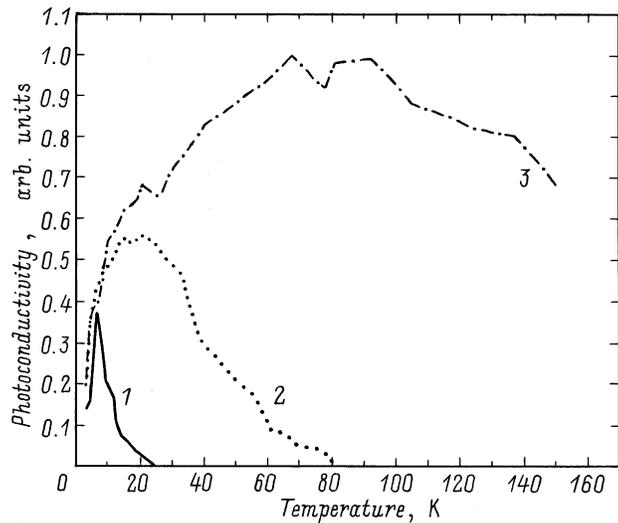


Рис. 3. Температурные зависимости микроволновой фотопроводимости кристаллов GaAs: 1 — до термообработки, 2 — после термообработки в течение 0.5 ч (ШГА-6), 3 — после термообработки в течение 3 ч (ШГА-4).

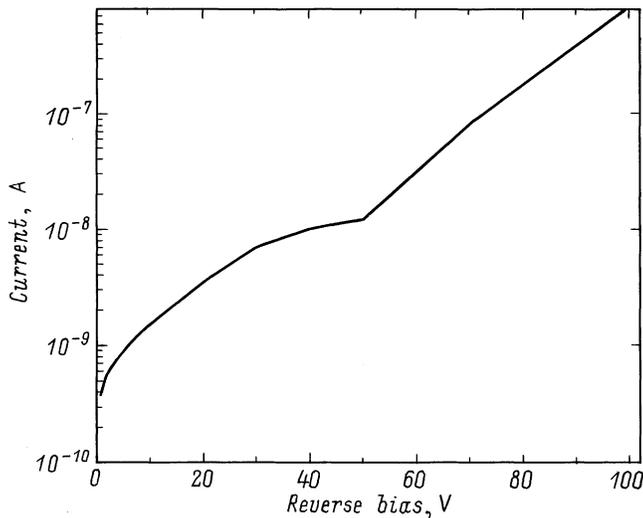


Рис. 4. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики барьера Шоттки на основе пластин GaAs, прошедших геттерирование.

Эффект геттерирования подтверждается также данными, полученными при измерении микроволновой фотопроводимости. На пластинах GaAs, до и после геттерирования, измерялась микроволновая фотопроводимость с помощью метода, аналогичного разработанному для исследования спин-зависимой рекомбинации (СЗР) в кремнии [6–8].

Температурные зависимости микроволновой фотопроводимости для чистых кристаллов GaAs до и после ТО показаны на рис. 3. До ТО образцы имели низкое сопротивление, которое значительно снижало Q -фактор. Фотоотклик этих образцов наблюдался только при низких

температурах в диапазоне 3–25 К, при максимальном значении при ~ 5 –7 К (см. рис. 3, кривая 1). ТО в течение 0.5 ч увеличивало сопротивление кристалла, а фотоотклик появлялся при более высоких температурах, ниже 70 К (рис. 3, кривая 2). После трехчасовой ТО образцы имели повышенное сопротивление даже при комнатной температуре, а фотоотклик хорошо наблюдался во всем температурном диапазоне (рис. 3, кривая 3).

Увеличение темновой фотопроводимости образцов после ТО не может быть объяснено простой компенсацией мелких доноров глубокими центрами, так как обычно в этом случае наблюдается увеличение скорости рекомбинации фотовозбужденных носителей и, следовательно, уменьшается фотопроводимость. В частности, этот эффект наблюдается в GaAs, легированном Fe. Увеличение фотопроводимости в GaAs после ТО и отсутствие спектров СЗР–ЭПР может быть объяснено пассивацией мелких доноров и формированием электрически и парамагнитно неактивных центров.

На основе полученного материала были изготовлены барьеры Шоттки диаметром 2 мм. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики такого барьера приведена на рис. 4. Приведенные значения токов были такими же, как приводимые в работе [2] для детекторов излучения на основе GaAs, полученного в особо чистых условиях.

4. Заключение

Применение поверхностного геттерирования на пластинах GaAs толщиной 1.6 мм с начальной концентрацией носителей $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью 1500 – $2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ позволило достичь концентрации 10^8 – 10^{10} см^{-3} и подвижности $7000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Таким образом, первые успешные результаты являются обнадеживающими, а предложенный метод геттерирования представляется перспективным.

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 00-02-17026.

Список литературы

- [1] H.J. von Bardeleben, J.C. Bougoin. *Defect Control in Semiconductors*, ed. by K. Sumino (Elsevier, Amsterdam, 1990).
- [2] С.М. Buttar. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Rev. A*, **395**, 1 (1997).
- [3] Е.И. Иванов, Л.В. Лопатина, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Н.М. Шмидт. ВТП, **16**, 207 (1982).
- [4] L.F. Zakharenkov, V.V. Kozlovskii, A.T. Gorelenok, N.M. Shmidt. In: *Semiconductor Technology: Processing and Novel Fabrication Techniques*, ed. by M.E. Levinstein, M.S. Shur (N.Y., John Wiley & Sons Inc., 1997) p. 91.
- [5] А.Т. Гореленок, В.Л. Крюков, Г.П. Фурманов. Письма ЖТФ, **20**(13), 60 (1994).
- [6] Л.С. Власенко, М.П. Власенко, В.Н. Ломасов, В.А. Храмов. ЖЭТФ, **91**, 1037 (1986).

- [7] L.S. Vlasenko. In: *Semiconductors and Insulators: Optical and Spectroscopic Research*, ed. by Yu. Koptev (Nova Sciences Publishers, Inc. 1992) p. 217.
- [8] L.S. Vlasenko, Yu.V. Martynov, T. Gregorkiewicz, C.A.J. Ammerlaan. *Phys. Rev. B*, **52**, 1144 (1995).
- [9] C.H. Kang, J. Lagowski, H.C. Gatos. *J. Appl. Phys.*, **62**, 3482 (1987).
- [10] П.Н. Брунков, С. Гайбуллаев, С.Г. Конников, В.Г. Никитин, М.И. Папенцев, М.М. Соболев. *ФТП*, **25**, 338 (1991).
- [11] I. Ohbi, M. Takahama, K. Hiruma. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 1677 (1992).
- [12] N. Ohkobo, M. Shishikura, S. Matsumoto. *J. Appl. Phys.*, **73**, 615 (1993).

Редактор Т.А. Полянская

Surface gettering of background impurities and defects in GaAs wafers

L.S. Vlasenko, A.T. Gorelenok, V.V. Emtsev,
A.V. Kamanin, D.S. Poloskin, N.M. Shmidt

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract Experimental data on surface gettering of background impurities and defects from the bulk of undoped (111) GaAs wafers of 1.6 mm thick are reported. The concentration and mobility of charge carriers in initial wafers at room temperature were from 10^{15} cm^{-3} to $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $1500 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ to $2000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, respectively. The wafers were cut from GaAs crystals grown by the Czochralski technique from a nonstoichiometric melt with As excess. The gettering process was carried out by means of annealing of Y or SiO_2 surface layers of 1000 \AA thick. Annealing run at 400°C to 850°C in hydrogen ambient. As result of gettering, the concentration of charge carriers was found to be in the range of 10^8 cm^{-3} to 10^{10} cm^{-3} , whereas their mobility was increased to $7000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.