

УДК 621.315.592

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТЖИГА СЛИТКОВ И ПОДЛОЖЕК АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОНАНОЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОВОЛЬТАИКИ

А. П. Оксанич, С. Э. Притчин

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: pritchinse@ukr.net

Рассмотрены подходы к усовершенствованию технологии отжига слитков и подложек арсенида галлия. Определены начальные условия модели, описывающей связь плотности дислокаций, внутренние напряжения и параметры процесса отжига. Выполненные расчеты показали, что температурные градиенты в процессе отжига приводят к скачкообразному размножению дислокаций. В процессе исследования установлено, что если в процессе отжига не создается условий для появления деформация ползучести, то существуют только упругие деформации, и остаточные напряжения не создаются. Определены режимы отжига, которые обеспечивают лучшее отношение уровня остаточных напряжений и плотности дислокаций, которые составили: нагрев с температурным градиентом 120 °С до температуры 1040 °С, выдержка при температуре 1040 °С в течение пяти часов, охлаждение слитка с температурным градиентом 120 °С.

Ключевые слова: подложки арсенида галлия, отжиг, остаточные напряжения, плотность дислокаций.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДПАЛУ ЗЛИТКІВ І ПІДКЛАДОК АРСЕНІДУ ГАЛІЮ ДЛЯ ВИРОБІВ МІКРОНАНОЕЛЕКТРОНІКИ І ФОТОВОЛЬТАЇКИ

А. П. Оксанич, С. Е. Притчин

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: pritchinse@ukr.net

Розглянуті підходи до вдосконалення технології відпалу злитків і підкладок арсеніду галію. Визначені початкові умови моделі, що описує зв'язок густину дислокацій, внутрішні напруження й параметри процесу відпалу. Виконані розрахунки показали, що температурні градієнти в процесі відпалу призводять до стрибкоподібного розмноження дислокацій. У процесі дослідження встановлено, що якщо в процесі відпалу не створюються умови для появи деформації повзучості, то існують тільки пружні деформації, й залишкові напруги не створюються. Визначені режими відпалу, які забезпечують краще відношення рівня залишкових напруг і густини дислокацій, які склали: нагрівання з температурним градієнтом 120 °С до температури 1040 °С, витримка при температурі 1040 °С протягом п'яти годин, охолодження злитка з температурним градієнтом 120 °С.

Ключові слова: підкладки арсенід галію, відпал, залишкові напруги, густина дислокацій.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последние годы наблюдается быстрое увеличение спроса на системы мобильной связи, такие как сотовые телефоны, планшетные компьютеры, GPS навигаторы и т.д. Особенностью таких устройств является необходимость работы на сверхвысоких частотах. Полупроводником материалом на базе которых изготавливаются быстродействующие электронные устройства является арсенид галлия (GaAs).

Второй областью применения арсенида галлия является солнечная энергетика. Солнечные элементы на основе GaAs могут работать на температурах вплоть до 150–180 °С и при этом сохранять высокий к.п.д. Такие температурные режимы для кремниевых ФЭП являются недопустимыми (при температуре выше 60–70 °С к.п.д. кремниевых ФЭП падает вдвое) [1].

В основе электронных устройств и солнечных элементов лежат арсенид галлиевые подложки, которые изготавливаются из выращенных слитков.

Снижение стоимости электронных приборов и солнечных элементов на основе GaAs требует увеличения диаметра подложек, и как следствие увеличения диаметра слитков.

Слитки арсенида галлия в основном выращиваются методом Чохральского с жидкостной герметизацией. Технология выращивания слитков приводит к тому, что в процессе выращивания возникают температурные градиенты, приводящие к формиро-

ванию термоупругих напряжений и появлению дислокаций. С увеличением диаметра выращиваемого слитка уровень термоупругих напряжений возрастает [2].

Отжиг слитка и подложек – обязательный технологический процесс производства подложек GaAs. Во время отжига снимаются термоупругие напряжения, и как следствие улучшаются механические свойства слитка и электрические характеристики подложек. В процессе отжига происходит увеличение плотности дислокаций, и эта проблема становится все более серьезной с увеличением диаметра слитка. Отжиг подложек позволяет улучшить их оптические характеристики, в частности пропускание ИК излучения [3].

Решение задачи усовершенствования технологии и аппаратуры для отжига слитка и подложек арсенида галлия является актуальной задачей как с научной, так и с практической точки зрения.

Целью работы является усовершенствование технологии отжига слитков и подложек арсенида галлия путем определения режимов отжига при которых не происходит многократное увеличение дислокаций, а также разработка аппаратуры для производства процесса отжига.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. *Достижение цели* обеспечивается решением следующих задач:

– исследование влияния температурных режи-

мов на формирование дислокаций и величину термоупругих напряжений;

– определение технологических параметров процесса отжига.

Процесс отжига слитков арсенида галлия заключается в нагреве слитка с заданным температурным градиентом до определенной температуры, выдержке слитка при этой температуре заданное время и охлаждение слитка с заданным градиентом до температуры окружающей среды. Параметры процесса отжига зависят от диаметра слитка. В настоящее время эти параметры определяются технологом интуитивно, регулирование параметров производится аппаратчиком вручную.

В процессе отжига слиток подвергается воздействию высокой температуры (порядка 1000 °С) и, следовательно, подвергается пластической деформации, которая зависит от времени нагрева. В работах [4, 5] такая деформация называется деформацией ползучести.

Связь между деформацией ползучести и плотностью дислокаций в полупроводниковых материалах в виде аналитического выражения показана в работе [6].

Анализ процесса формирования напряжений и дислокаций во время отжига можно выполнить, используя результаты, полученные для этих параметров в процессе выращивания слитков GaAs [7, 8], с учетом того, что процесс отжига является более простым процессом чем выращивание. Это определяется тем, что при отжиге не изменяется геометрия слитка, и отсутствует слой жидкого герметизатора.

Рассмотрим влияние деформации слитка, вызываемой изменением температуры в процессе отжига, на формирование дислокаций. Как известно, общая деформация слитка может быть записана в виде:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^t + \varepsilon_{ij}^c, \quad (1)$$

где ε_{ij}^e – упругая деформация, ε_{ij}^t – тепловая деформация и ε_{ij}^c – деформация ползучести.

Значение деформации ползучести ε_{ij}^c может быть получено из работы [6], и, следовательно, основываясь на результатах работ [9, 10], можно записать:

$$\varepsilon_{ij}^c = f S_{ij}, \quad (2)$$

где

$$f = \frac{b k_0 N_m \exp(-Q/kT) (\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^p}{2\sqrt{J_2'}} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\sigma_{kk} \delta_{ij}}{3}, \quad J_2' = \frac{S_{ij} S_{ji}}{2}. \quad (4)$$

В выражении (3), (4) параметр N_m – плотность дислокаций, σ_{ij} – напряжение, S_{ij} – девиатор напряжения, который характеризует отклонение данного напряженного состояния от состояния всестороннего растяжения или сжатия, J – второй инвариант девиатора напряжения, $\sqrt{J_2'}$ – тепловое напряжение.

Из выражения (3) можно найти скорость размножения дислокаций:

$$\dot{N}_m = K k_0 N_m e^{-Q/kT} (\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m} - \tau_d)^p \times (\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m})^\lambda \quad (5)$$

где D – коэффициент механического упрочнения, b – вектор Бюргерса, Q – потенциал Пайерлса, k – постоянная Больцмана.

Из выражений (2) и (5) можно видеть, что скорость размножения дислокаций и деформация ползучести становятся равными нулю в том случае, если

$$\sqrt{J_2'} - D\sqrt{N_m} - \tau_d \leq 0 \quad (6)$$

Следовательно, если начальная плотность дислокаций N_{m0} равна 0, то и N_m – рано нулю. Таким образом, нужно принять начальное значение N_{m0} , в качестве которого можно использовать значение этого параметра в слитке после выращивания.

Напряжение торможения дислокаций τ_d можно определить по выражению:

$$\log_{10} \tau_d = 4,83 + 1382/T. \quad (7)$$

Численный анализ влияния температуры в процессе отжига на плотность дислокаций можно провести с использованием метода конечных элементов [11]. Для решения этой задачи мы использовали программный пакет Ansys.

В качестве начальных условий для расчета были выбраны следующие значения, полученные из работы [12]:

N_m – плотность дислокаций	5,0 x 10 ⁶ m ⁻²
B – величина вектора Бюргерса	4,0 x 10 ⁻⁸ m
Q – потенциал Peierls	1,5 eV
k – постоянная Больцмана	8,617 x 10 ⁻⁵ eV/K
K – материальная константа	7,0 x 10 ⁻³ m/N
D – к-т механического упрочнения	3,1 N/m
k_0 – материальная константа	1,80 x 10 ⁻⁸ m ^{2p+1/Nps}
p – материальная константа	1,7
λ – материальная константа	1,0

Анализ тепловых режимов при отжиге слитка и пластин позволяет сделать вывод о температурной зависимости коэффициента удельной теплопроводности k от удельной теплоемкости C_p .

При увеличении температуры k уменьшается и C_p увеличивается. Это означает, что теплота плохо распространяется в слитке, и перепад температур в слитке становится большим, когда температура становится высокой.

Рассчитанное распределение температуры в слитке при отжиге показано на рис. 1. Можно видеть, что разница температуры в центре и на поверхности слитка достигает 5 °С, что вызывает температурный градиент.

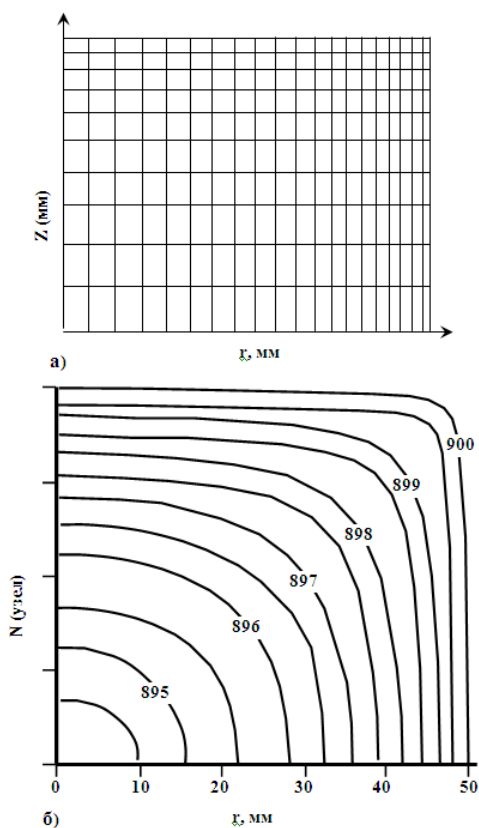


Рисунок 1 – Рассчитанные значения распределения температуры в слитке при отжиге: а) сетка для моделирования, б) распределение температуры по радиусу слитка

Для анализа влияния температурных режимов на формирование дислокаций и величину термоупругих напряжений расчетным методом мы выбрали наиболее типовые два режима отжига (рис. 2 и 3), отличающиеся температурными градиентами и временем этапов процесса.

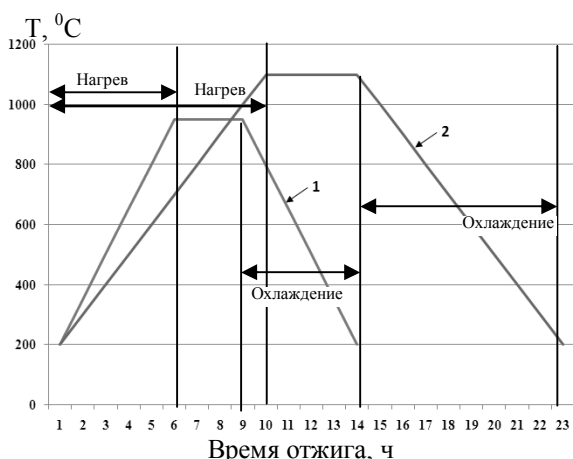


Рисунок 2 – Режимы отжига слитка для расчета дислокации и напряжений: 1 – режим № 1; 2 – режим № 2

Первый режим характеризуется температурным градиентом $150\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$ и максимальной температурой $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, второй режим – температурным градиентом $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и максимальной температурой $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

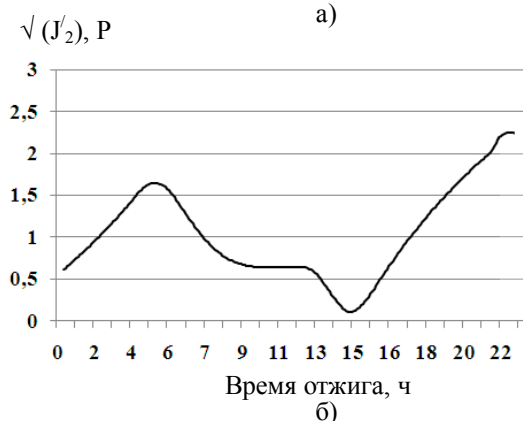
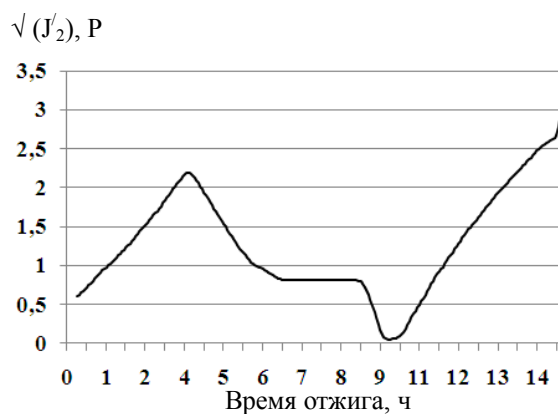


Рисунок 3 – Результаты расчета влияния времени отжига на тепловое напряжение $\sqrt{(J_2)}$: а) режим № 1; б) режим № 2

Можно сделать вывод, что в процессе нагрева слитка температурный градиент внутри слитка увеличивается, за счет температурных зависимостей арсенида галлия, что приводит к увеличению теплового напряжения $\sqrt{(J_2)}$.

Нагрева в течение четырех часов для режима 1 и шести часов для режима 2 приводит к резкому размножению дислокаций (рис. 3), вызванное превышением значения теплового напряжения значения напряжения торможения дислокаций τ_d .

После превышения порогового значения $\sqrt{(J_2)}$ начинает уменьшаться за счет эффекта релаксации напряжений, вызванного размножением дислокаций.

Когда слиток выдерживается при максимальной температуре, напряжение, которое снималось во время процесса прогрева, остается в слитке остаточным напряжением.

Направление остаточных напряжений сдвига становится обратным тому направлению напряжению сдвига, которое образовалось во время процесса нагрева.

Тепловое напряжение всегда положительно, поэтому, когда значение $\sqrt{(J_2)}$ превышает τ_d , формируется резкое снижение значения $\sqrt{(J_2)}$ (изгиб на кривой в точке 9 часов для режима № 1 и в точке 14 часов для режима № 2 (рис. 3)), что приводит к очередному скачку плотности дислокаций, как можно видеть для соответствующих точек на рис. 4.

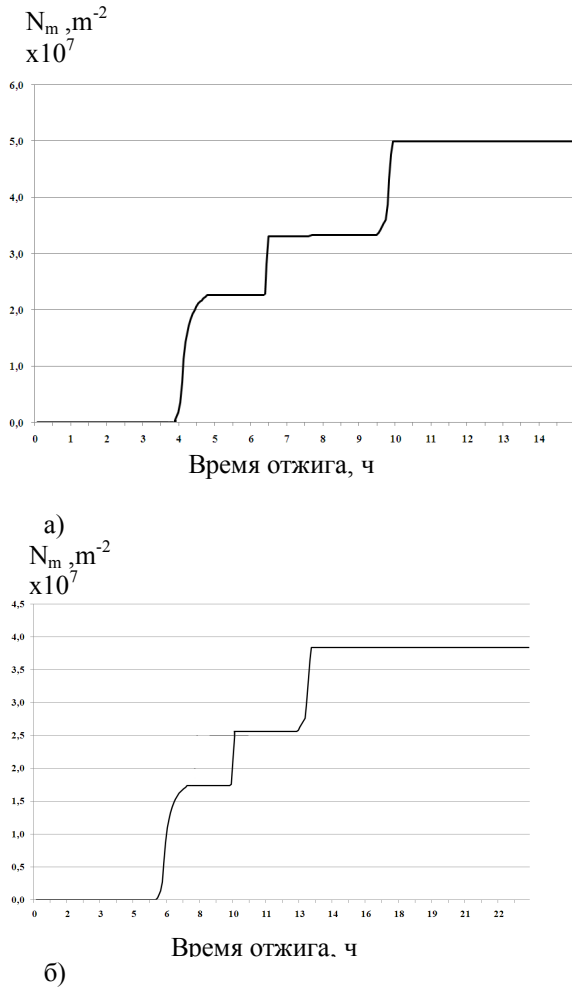


Рисунок 4 – Результаты расчета влияния времени отжига на плотность дислокаций N_m : а) режим № 1; б) режим № 2

В начале процесса охлаждения слитка температура понижается, и тепловое напряжение опять увеличивается за счет градиента температур в слитке. Это приводит к росту дислокаций, и в последствии значение плотности дислокаций стабилизируется. При этом остаточные напряжения остаются в слитке.

Если в процессе отжига не создается условий для появления деформация ползучести, то существуют только упругие деформации и остаточные напряжения не создаются. В том случае, если происходит размножение дислокаций, то это вызывает большую релаксацию напряжения и, следовательно, остаточные напряжения остаются в слитке после процесса отжига.

Сравнивая параметры отжига для режима № 1 и режима № 2, можно видеть, что, чем больше градиент температуры dT/dt , тем выше плотность дислокации. Влияние максимального значения температуры оказывает не такое большое значение как градиент.

Для подтверждения расчетных данных нами были проведены практические исследования слитков арсенида галлия диаметром 100 мм, марки АГЧХ, выращенных в направлениях [100] и [111].

При исследованиях остаточных напряжений нами использовалась автоматизированная установка измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs «Полярон-2», реализующий метод SIRP и предложенную авторами экспрессную методику определения структурного совершенства в пластинах GaAs [13].

Исследование остаточных напряжений проводилось на специально подготовленных шлифовано-травленных пластинах толщиной $450 \pm 15 \mu m$ вырезанных из верхней части слитка

При исследовании плотности дислокаций мы применили автоматизированный телевизионный метод подсчета дислокаций, описанный в [14].

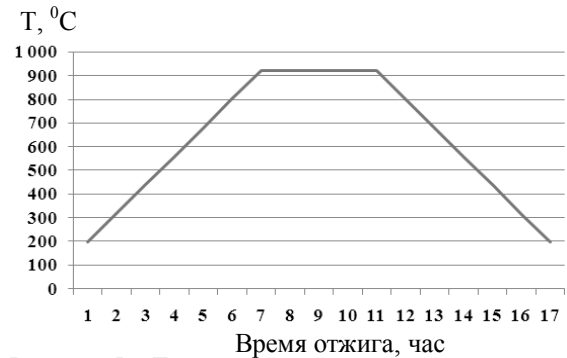


Рисунок 5 – Температурный режим усовершенствованной технологии отжига слитка GaAs

Выполненный анализ расчетных данных по плотности дислокаций и остаточным напряжениям позволил усовершенствовать технологический режим отжига слитка путем использования наиболее оптимальных параметров процесса как с точки зрения градиента температуры, так и времени процесса отжига. Температурный режим отжига по усовершенствованной технологии представлен на рис. 5.

Результаты измерения величины остаточных напряжений и плотности дислокаций в слитках отожженных по усовершенствованной технологии показаны на рис. 6, 7.

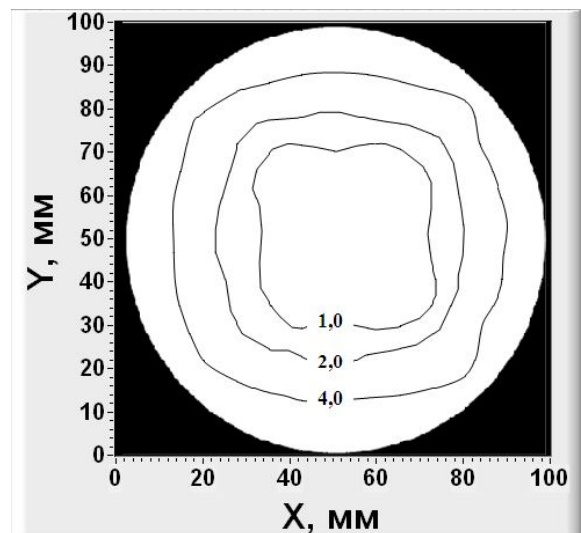


Рисунок 6 – Линии изонапряжения $[Pa \times 10^6]$ для отожженного ПИН GaAs в ориентации [100]

Можно видеть, что слитки ориентации [111] имеют более высокий уровень остаточных напряжений, чем слитка в ориентации [100]. Это связано с различием значений упругих постоянных C_{11} , C_{12} и C_{44} для этих ориентаций.

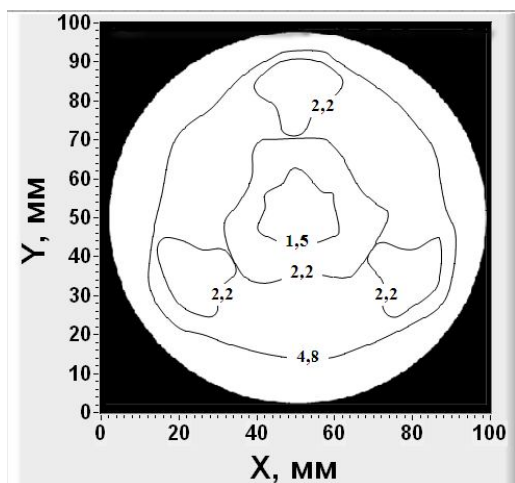


Рисунок 7 – Линии изонапряжения [$\text{Pa} \times 10^6$] для отожженного ПИН GaAs в ориентации [111]

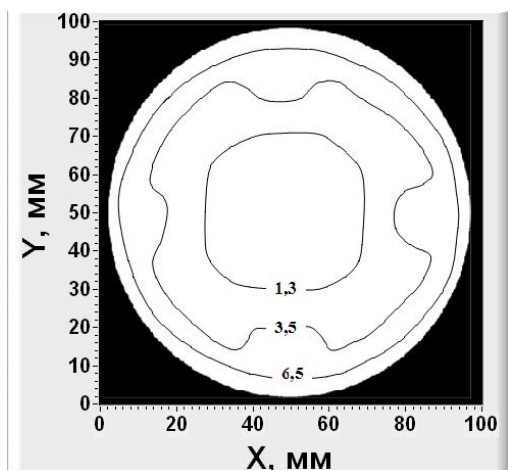


Рисунок 8 – Линии изоплотности дислокаций [$\text{cm}^{-2} \times 10^6$] для отожженного ПИН GaAs в ориентации [100]

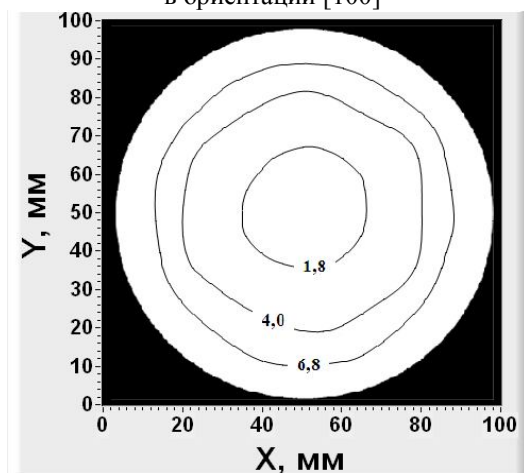


Рисунок 9 – Линии изоплотности дислокаций [$\text{cm}^{-2} \times 10^6$] для отожженного ПИН GaAs в ориентации [111]

Измеренные авторами значения плотности дислокаций для этих же слитков приведены на рис. 8, 9.

Экспериментальные результаты подтверждают теоретические расчеты, касающиеся соотношения между плотностью дислокаций и остаточными напряжениями в слитках GaAs, подвергнутых отжигу.

Усовершенствование технологии отжига приводит к увеличению плотности дислокации на 5–7 % по сравнению с существующей технологией, но в тоже время на 10–15 % снижается уровень остаточных напряжений, что уменьшает вероятность растрескивания подложек при из механической обработке и улучшает пропускание подложек в ИК части спектра.

ВЫВОДЫ. 1. Усовершенствована технология отжига слитков арсенида галлия, которая позволяет снизить остаточные напряжения в слитке после отжига на 10% по сравнению с существующей технологией.

2. Определены оптимальные режимы отжига, значение которых составляют – нагрев с температурным градиентом $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка при температуре $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 часов, охлаждение слитка с температурным градиентом $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Показано, что температурные градиенты во время процесса отжига приводят к увеличению плотности дислокаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38. – Вып. 8. – С. 937–948.
2. Meduoye G.O., Bacon D.J., Evans D.J. Computer modelling of temperature and stress distributions in LEC-grown GaAs crystals // J. of Crystal Growth. – 1991. – Vol. 108. – PP. 627–636.
3. Taylor P.J., Jesser W.A., Benson J.D. Optoelectronic device performance on reduced threading dislocation density GaAs/Si // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89. – PP. 111–122.
4. Volk J., Muller G. A new model for the calculation of dislocation formation in semiconductor melt growth by taking into account the dynamics of plastic deformation // J. of Crystal Growth. – 1989. – Vol. 97. – PP. 136–145.
5. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1961. – 532 с.
6. Yonenaga I., Sumino K.. Dislocation Dynamics in GaAs Crystal Grown from Melt // J. Appl. Phys. – 1978. – Vol. 50. – PP. 685–693.
7. Оксанич А.П., Шепель Л.Г., Батареев В.В. Моделирование процессов образования дислокаций под действием термических напряжений в слитках GaAs, выращиваемых из расплава методом Чохральского с жидкостной герметизацией // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4. – № 2. – С. 185–194.
8. Suezawa M., Sumino K., Yonenaga I. Dislocation dynamics in the plastic deformation of silicon crystals. II. Theoretical analysis of experimental results // J. Phys. Status Solidi (a). – 1979. – Vol. 51. – PP. 217–226.

9. Tsai C.T., Dillion O.W., DeAngelis, Jr. R.J. The Constitutive Equation for Silicon and Its Use in Crystal Growth Modeling // *J. Eng. Mater. Technol.* – 1990. – Vol. 112. – PP. 183–187.

10. Tsai C.T., Yao M.W., Chait A. Prediction of dislocation generation during Bridgman growth of GaAs crystals // *J. Crystal Growth.* – 1992. – Vol. 125. – PP. 69–80.

11. Tsai C.T. On the finite element modeling of dislocation dynamics during semiconductor crystal growth // *J. Crystal Growth.* – 1991. – Vol. 113. – PP. 499–507.

12. Maroudas D., Brown R.A. On the prediction of dislocation formation in semiconductor crystals grown from the melt: analysis of the Haasen model for plastic

deformation dynamics // *J. Crystal Growth.* – 1991. – Vol. 108. – PP. 399–415.

13. Оксанич А.П., Хозя П.А., Притчин С.Е. Розробка процедури визначення температурних полів і термопластичних напруг в злитках GaAs, вирощених LEC // *Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління.* – 2008. – № 1(19). – С. 4–10.

14. Притчин С.Е., Полтавец В.О. Система ідентифікації мікроефектів слитків кремнія телевізійним методом // *Нові технології. Науковий вісник ІЕНТ.* – Кременчук, 2005. – № 3 (9). – С. 36–39.

TECHNOLOGY IMPROVEMENT OF INGOTS AND GALLIUM ARSENIDE WAFERS ANNEALING FOR PRODUCTS OF MICRO- AND NANO-ELECTRONICS AND PHOTOVOLTAICS

A. Oksanich, S. Pritchinn

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: pritchinse@ukr.net

The authors discuss approaches to improve the technology of ingots and wafer of gallium arsenide annealing. The initial conditions of the model describing the relations between dislocation density, internal stresses and parameters of the annealing process were determined. The calculations performed have shown that the temperature gradients during the annealing process result in a sharp jump-in increase of dislocations. The research results have found that when the conditions for the creep deformation occurring are not accompanying the annealing process, then there are only elastic deformation applied while residual stresses are not exerted. The authors have set the annealing regimes that provide better correlations between residual stresses level and dislocation density, they have amounted to heat up to 1040 °C at a temperature gradient of 120 °C, holding for 5 hours at a temperature of 1040 °C, and ingot cooling at a temperature gradient of 120 °C.

Key words: gallium arsenide wafers, annealing, residual strain, dislocation density.

REFERENCES

1. Alfeyorov, Zh. I., Andreev, V. M., Rumiantsev, V. D. (2004), “Trends and prospects of development of solar photovoltaic energetics”, // *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, vol. 38, no. 8 – pp. 937–948.

2. Meduoye, G.O., Bacon, D.J., Evans, K.E. (1991), “Computer modelling of temperature and stress distributions in LEC-grown GaAs crystals”, *J. of Crystal Growth*, vol. 108, pp. 627–636.

3. Taylor, P. J., Jesser, W. A., Benson, J. D. (2001), “Optoelectronic device performance on reduced threading dislocation density GaAs/Si”, *J. Appl. Phys.*, vol. 89, pp. 111–122.

4. Volkl, J., Muller, G. (1989), “A new model for the calculation of dislocation formation in semiconductor melt growth by taking into account the dynamics of plastic deformation”, *J. of Crystal Growth*, vol. 97, pp. 136–145.

5. Bezuhov, N. I. (1961), *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of theory of elasticity, plasticity, and creeping], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

6. Yonenaga, I., Sumino, K. (1978), “Dislocation Dynamics in GaAs Crystal Grown from Melt”, *J. Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 685–693.

7. Oksanich, A.P., Shepel, L.G., Batareev, V.V. (2005), “Modelling of a dislocation development under the thermal stresses in the GaAs ingots melt-grown by the Chokhralskyi method with liquid encapsulation”, *Prikladnaia radioelektronika*, vol. 4, no. 2, pp. 185–194.

8. Suezawa, M., Sumino, K., Yonenaga, I. (1979), “Dislocation dynamics in the plastic deformation of sili-

con crystals. II. Theoretical analysis of experimental results”, *J. Phys. Status Solidi (a)*, vol. 51, pp. 217–226.

9. Tsai, C.T., Dillion, O.W., DeAngelis, Jr. R.J. (1990), “The Constitutive Equation for Silicon and Its Use in Crystal Growth Modeling”, *J. Eng. Mater. Technol.* vol. 112, pp. 183–187.

10. Tsai, C.T., Yao, M.W., Chait, A. (1992), “Prediction of dislocation generation during Bridgman growth of GaAs crystals”, *J. Crystal Growth*, vol. 125, pp. 69–80.

11. Tsai, C.T. (1991), “On the finite element modeling of dislocation dynamics during semiconductor crystal growth”, *J. Crystal Growth*, vol. 113, pp. 499–507.

12. Maroudas, D., Brown, R.A. (1991), “On the prediction of dislocation formation in semiconductor crystals grown from the melt: analysis of the Haasen model for plastic deformation dynamics”, *J. Crystal Growth*, vol. 108, pp. 399–415.

13. Oksanich, A.P., Hozia, P.A., Pritchinn, S.E. (2008), “Development of determination procedure of temperature fields and thermoplastic stresses in the LEC-grown GaAs ingots”, *Novi tekhnologii. Naukovii visnik Kremenchtckogo universitetu ekonomiki, informatciinikh tekhnologii i upravlinnia*, № 1(19), pp. 4–10.

14. Pritchinn, S.E., Poltavets V.O. (2005), “Identification system for microdefects of Si ingots by television method”, *Novi tekhnologii. Naukovii visnik Kremenchtckogo universitetu ekonomiki, informatciinikh tekhnologii i upravlinnia*, no.3 (9), pp. 36–39.

Стаття надійшла 28.03.2013.

