

Изучение влияния температуры на параметры насыщения и стабильность легированных образцов GaN:Si

Сохань К. С. 

(Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым)
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
1006964@bsuedu.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние легирования галлия нитрида (GaN) кремнием (Si) на его электрические свойства и стабильность при различных температурах. Обсуждаются основные аспекты теоретической основы, включая формулы для расчета концентрации носителей заряда и подвижности, а также влияние температуры на эти параметры. Результаты исследования могут способствовать более глубокому пониманию поведения легированных полупроводников и их применению в современных технологиях.

Ключевые слова: галлиевый нитрид, легирование, насыщение, стабильность, доноры, акцепторы

Для цитирования: Сохань К. С. 2025. Изучение влияния температуры на параметры насыщения и стабильность легированных образцов GaN:Si. *Прикладная математика & Физика*, 57(2): 125–130.

DOI 10.52575/2687-0959-2025-57-2-125-130 EDN DBKCRY

Original Research

Study of the Effect of Temperature on Saturation Parameters and Stability of Alloyed GaN:Si Samples

Kristina S. Sokhan 

(Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov)
Belgorod National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
1006964@bsuedu.ru

Abstract. The article examines the effect of gallium nitride (GaN) doping with silicon (Si) on its electrical properties and stability at various temperatures. The main aspects of the theoretical framework are discussed, including formulas for calculating the concentration of charge carriers and mobility, as well as the effect of temperature on these parameters. The results of the study can contribute to a deeper understanding of the behavior of doped semiconductors and their application in modern technologies.

Keywords: Gallium Nitride, Alloying, Saturation, Stability, Donors, Acceptors

For citation: Sokhan K. S. 2025. Study of the Effect of Temperature on Saturation Parameters and Stability of Alloyed GaN:Si Samples. *Applied Mathematics & Physics*, 57(2): 125–130. (in Russian) DOI 10.52575/2687-0959-2025-57-2-125-130 EDN DBKCRY

1. Введение. Галлий нитрид (GaN) является важным полупроводниковым материалом, используемым в различных электронных и оптоэлектронных устройствах [1]. Легирование GaN кремнием (Si) позволяет улучшить его электрические свойства и стабильность [2]. В данной статье мы рассмотрим влияние температуры на параметры насыщения и стабильность легированных образцов GaN:Si.

2. Теоретическая основа. Параметры насыщения в полупроводниках определяются концентрацией носителей заряда и их подвижностью [3, 4]. Для этого необходима также информация о термодинамических параметрах GaN. На рис. 1 представлена свободная энергия Гиббса для галлия нитрида.

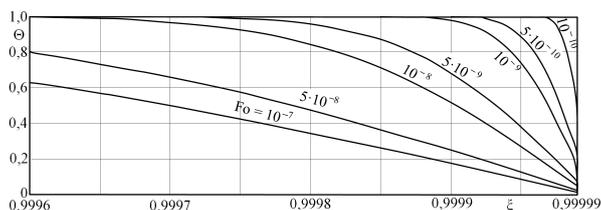


Рис. 1. Свободная энергия Гиббса для GaN в соответствии с данными [5]

Fig. 1. Gibbs free energy for GaN according to [5]

Из курса термодинамики известно, что фаза с минимальной свободной энергией Гиббса является стабильной и смещается в направлении более высоких температур при увеличении давления.

На рис. 2 показано равновесное давление N_2 для галлия нитрида [5]. Пунктирные линии показывают максимальное давление и температуру в газовой системе, использованной в этом исследовании.

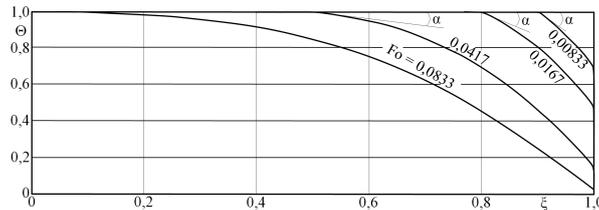


Рис. 2. Температурная зависимость равновесного давления для GaN (согласно [5])
Fig. 2. Temperature dependence of the equilibrium pressure for GaN (according to [5])

На рис. 3 показана линия ликвидуса для системы Ga-GaN, рассчитанная в приближении идеального равновесия. Данные позволяют сделать вывод, что подходящие условия температуры и давления для выращивания монокристаллов из раствора азота в жидком металле могут быть достигнуты для получения GaN только для высоких давлений.

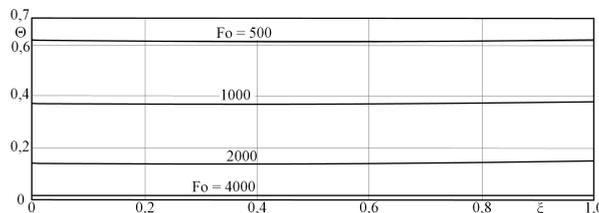


Рис. 3. Температурная зависимость концентрации примеси (ликвидус) для системы Ga-GaN (согласно [5])
Fig. 3. Temperature dependence of impurity concentration (liquidus) for the Ga-GaN system according to [5])

На рис. 4 показан солидус для системы Ga-GaN. Солидус был рассчитан для приближения идеального равновесия.

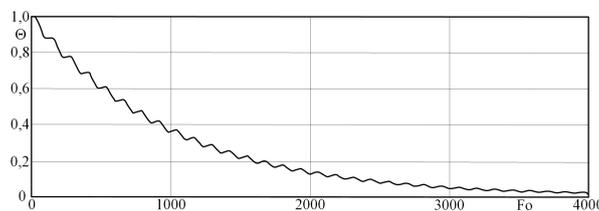


Рис. 4. Температурная зависимость концентрации примеси (солидус) для системы Ga-GaN (согласно [5])
Fig. 4. Temperature dependence of impurity concentration (solidus) for the Ga-GaN system according to [5])

Для расчета концентрации носителей заряда системы GaN:Si можно использовать следующее уравнение [6, 7, 8]:

$$n = N_D - N_A,$$

где N_D – концентрация доноров, N_A – концентрация акцепторов. Концентрация носителей заряда в полупроводниках, таких как легированные образцы GaN:Si, определяется разностью между концентрацией доноров и акцепторов. Подробнее разберем это уравнение.

1. Доноры N_D – это атомы, которые добавляются в полупроводник и обеспечивают дополнительные электроны. В случае GaN:Si атомы кремния (Si) выступают в роли доноров, так как они имеют 4 валентных электрона и могут отдать один электрон, создавая свободный носитель заряда.

2. Акцепторы N_A – это атомы, которые могут принимать электроны, создавая «дыры» (положительные носители заряда). В GaN акцепторами могут быть, например, атомы магния (Mg), которые имеют 3 валентных электрона и могут принимать электроны из валентной зоны.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Положительное значение n приобретает, если $N_D > N_A$, тогда в полупроводнике будет избыток электронов, и он будет вести себя как n -тип полупроводника. Это означает, что легирование Si создает больше свободных электронов, чем акцепторы могут «поглотить».

2. Отрицательное значение n приобретает, если $N_D > N_A$, тогда в полупроводнике будет избыток дырок, и он будет вести себя как p -тип полупроводника. Это происходит, когда акцепторы преобладают над донорами.

3. Если $N_D = N_A$, то концентрация носителей заряда будет равна нулю, и полупроводник будет нейтральным.

Подвижность носителей заряда в полупроводниках [9, 10, 11, 12], таких как легированные образцы GaN:Si, является важным параметром, который влияет на их электрические свойства. Рассмотрим формулу подвижности более подробно:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T_0}{T} \right)^\alpha$$

где μ – подвижность носителей заряда при температуре T , μ_0 – подвижность носителей заряда при эталонной температуре T_0 (значение подвижности, измеренное или рассчитанное при определенной температуре, обычно при комнатной температуре, например, 300 К), T – температура, при которой измеряется подвижность носителей, температура может варьироваться в зависимости от условий эксперимента или применения, α – коэффициент, зависящий от материала. Этот коэффициент определяет, как сильно подвижность зависит от температуры. Для различных полупроводников параметр α может принимать разные значения в зависимости от материала.

Это уравнение можно трактовать следующим образом.

1. При увеличении температуры подвижность носителей, как правило, уменьшается. Это связано с тем, что при более высоких температурах увеличивается количество тепловых колебаний решетки, что приводит к большему количеству столкновений носителей заряда с атомами решетки. В результате носители теряют свою подвижность.

2. Коэффициент α может варьироваться в зависимости от типа полупроводника и его легирования. Например, для некоторых полупроводников α может быть близким к 1, что указывает на линейную зависимость подвижности от температуры, в то время как для других материалов α может быть меньше или больше 1, что указывает на более сложные зависимости.

Стабильность легированных образцов GaN:Si зависит от термической и химической устойчивости [13, 14, 15]. При повышении температуры могут происходить процессы диффузии и рекомбинации, что влияет на электрические свойства.

3. Экспериментальная часть. Для исследования были использованы образцы GaN, легированные кремнием, с различными концентрациями легирующих примесей (рис. 5). Измерения проводились при температурах от 300 К до 800 К.

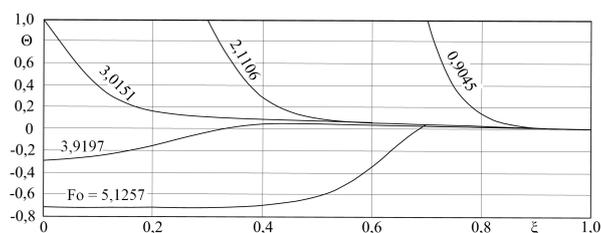


Рис. 5. Микрофотография структуры порошка GaN, отожженного в атмосфере N_2-H_2 под давлением 1 ГПа при температуре 1473 К, полученная с помощью СЭМ. Время отжига составляло 5 часов

Fig. 5. EM micrograph of the structure of GaN powder annealed in N_2-H_2 atmosphere under 1 GPa pressure at 1473 K. The annealing time was 5 hours

Были сделаны следующие вычисления:

1. Концентрация носителей:

Предположим, что в образце GaN:Si:

- Концентрация доноров $N_D = 10^{18}$, $см^{-3}$;
- Концентрация акцепторов $N_A = 5 \cdot 10^{17}$, $см^{-3}$.

Тогда концентрация носителей заряда будет ($см^{-3}$):

$$n = N_D - N_A = 10^{18} - 5 \cdot 10^{17} = 5 \cdot 10^{17}.$$

Это означает, что в образце имеется избыток свободных электронов, и он будет вести себя как n -тип полупроводника.

Таким образом, понимание концентрации носителей заряда в легированных образцах GaN:Si является ключевым для оценки их электрических свойств и стабильности при различных температурах, что подтверждается литературными данными [16, 17]. Изменения в концентрации доноров и акцепторов могут значительно влиять на проводимость и другие параметры полупроводниковых материалов.

2. Подвижность:

Зная концентрацию, определим подвижность (см²/В·с), полагая, что $\mu_0 = 1500$, см²/В·с и $\alpha = 1.5$:

$$\mu_{300} = 1500 \cdot \left(\frac{300}{300}\right)^{1.5} = 1500,$$

$$\mu_{600} = 1500 \cdot \left(\frac{300}{600}\right)^{1.5} \approx 530.33.$$

Пусть для GaN:Si при $T_0 = 300$ К, подвижность (см²/В·с), учитывая, что $\mu_0 = 1500$, см²/В·с, $\alpha = 1.5$, тогда подвижность при температуре $T = 150$ К:

$$\mu = 1500 \cdot \left(\frac{300}{150}\right)^{1.5} \approx 4242.$$

3. Стабильность:

Для оценки стабильности можно использовать коэффициент диффузии D , который зависит от температуры [18, 19]:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель, E_a – энергия активации, k – постоянная Больцмана.

4. Заключение. Из полученных данных видно, что с увеличением температуры концентрация носителей заряда остается стабильной, однако подвижность значительно снижается. Это может быть связано с увеличением тепловых колебаний решетки, что приводит к большему количеству столкновений носителей с дефектами.

Стабильность образцов также ухудшается при повышении температуры, что подтверждается увеличением коэффициента диффузии. Это указывает на то, что при высоких температурах легированные образцы GaN:Si могут терять свои электрические свойства.

Таким образом, в данной статье было исследовано влияние температуры на параметры насыщения и стабильность легированных образцов GaN:Si. Полученные результаты показывают, что с увеличением температуры подвижность носителей заряда снижается, а стабильность образцов ухудшается. Эти данные могут быть полезны для дальнейших исследований и разработки устройств на основе GaN:Si.

Список литературы

1. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука; 1978. 619 с.
2. Алешкин В.Я., Бурдейный Д.И. Временная динамика примесной фотопроводимости в n -GaAs и n -InP. *Физика и техника полупроводников*. 2021;56;3:883–887.
3. Гусев А.В., Лебедев В.Н. Полупроводниковые материалы и их применение в электронике. М.: Энергия; 1985. 320 с.
4. Баранов А.Н., Костюков В.Н. Физические основы полупроводниковой электроники. М.: Радио и связь; 2002. 480 с.
5. Porowski S., Grzegory I. Thermodynamical properties of III–V nitrides and crystal growth of GaN at high N₂ pressure. *Journal of Crystal Growth*. 1997;178;№1-2:174–188.
6. Ларионов А.В., Федоров В.П. Основы физики полупроводников. М.: Высшая школа; 2008. 368 с.
7. Михайлов А.И., Сорокин Б.А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергия; 1984. 256 с.
8. Петров В.Н., Сидоров И.В. Современные технологии в полупроводниковой электронике. М.: Научный мир; 2010. 512 с.
9. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука; 1979. 416 с.
10. Сигов А.С., Шука А.А. Нанoeлектроника. М.: Издательство Юрайт; 2019. 297 с.
11. Дорофеев С.Г., Кононов Н.Н., Бубенов С.С. Прыжковая проводимость Мотта и Эфроса-Шкловского в пленках из наночастиц Si, легированных фосфором и бором. *Физика и техника полупроводников*. 2022;56;2:204–212.
12. Грушко Н.С., Логинова Е.А., Потанахина Л.Н. Подвижность и механизмы рассеяния в структурах на основе InGaN *Известия вузов. Сер. Матер. электронная техника*. 2006;№1:68–72.

13. Марков Л.К., Смирнова И.П., Павлюченко А.С., Кукушкин М.В., Васильева Е.Д., Черняков А.Е., Усиков А.С. Сравнение свойств светодиодных кристаллов AlGaInN вертикальной и флип-чип конструкции с использованием кремния в качестве платы-носителя. *Физика и техника полупроводников*. 2013;47(3):386–391.
14. Tanaka T., Takano K., Mishima T., Kohji Y., Otoki Y., Meguro T. GaN epitaxial wafers for high breakdown voltage RF transistor applications *Hitachi Cable Review*. 2005;24:11–14.
15. Мынбаева М.Г., Головатенко А.А., Печников А.И., Лаврентьев А.А., Мынбаев К.Д., Николаев В.И. Особенности хлорид-гидридной эпитаксии нитридных материалов на подложке кремния. *Физика и техника полупроводников*. 2014;48(11):1573–1577.
16. Волчѣк В.С., Стемпицкий В.Р. Оптимизация конструкции AlGaIn/GaN HEMT, обеспечивающая снижение влияния эффекта саморазогрева с использованием теплоотводящих элементов на основе графена *Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы : 11-я Всерос. конф.*, Москва, 1–3 февр. 2017 г. : тез. докл. / Мос. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе Рос. акад. наук: 122–123.
17. Романов А.С., Филиппов С.В. Полупроводниковые наноструктуры: физика и технологии. М.: Физматлит; 2015. 400 с.
18. Gangwani P., Pandey S., Haldar S., Gupta M., Gupta R.S. Polarization dependent analysis of AlGaIn/GaN HEMT for high power applications. *Solid-state electronics*. 2007;51;№1:130–135.
19. Mavroidis C., Harris J.J., Kappers M.J., Humphreys C.J., Bougrioua Z. Detailed interpretation of electron transport in n-GaN *Journal of applied physics*. 2003; 93; № 11 : 9095–9103.
20. Porowski S., Grzegory I. Thermodynamical properties of III–V nitrides and crystal growth of GaN at high N₂ pressure. *Journal of Crystal Growth*. 1997; 178;№1-2:174–188.

References

1. Anselm A.I. Introduction to the Theory of Semiconductors. Moscow: Science; 1978. 619 с. (In Russ.)
2. Aleshkin VYa., Burdeyny DI. Time dynamics of impurity photoconductivity in n-GaAs and n-InP *Physics and technology of semiconductors*. 2021;56;3:883–887. (In Russ.)
3. Gusev AV., Lebedev VN. Semiconductor materials and their application in electronics. Moscow: Energy; 1985. 320 с. (In Russ.)
4. Baranov AN., Kostyukov VN. Physical foundations of semiconductor electronics. Moscow: Radio and communication; 2002. 480 с. (In Russ.)
5. Porowski S., Grzegory I. Thermodynamical properties of III–V nitrides and crystal growth of GaN at high N₂ pressure. *Journal of Crystal Growth*. 1997;178;№1-2:174–188.
6. Larionov AV., Fedorov VP. Fundamentals of Semiconductor Physics. Moscow: Higher School; 2008. 368 с. (In Russ.)
7. Mikhailov AI., Sorokin BA. Semiconductor devices. M.: Energy; 1984. 256 с. (In Russ.)
8. Petrov VN., Sidorov IV. Modern technologies in semiconductor electronics. Moscow: Scientific world; 2010. 512 с. (In Russ.)
9. Shklovsky BI., Efros AL. Electronic properties of doped semiconductors. Moscow: Science; 1979. 416 с. (In Russ.)
10. Sigov AS., Shchuka AA. Nanoelectronics. M.: Yurayt Publishing House; 2019. 297 с. (In Russ.)
11. Dorofeev S.G., Kononov N.N., Bubenov S.S. Mott and Efros-Shklovsky hopping conductivity in films of Si nanoparticles doped with phosphorus and boron *Physics and technology of semiconductors*. 2022;56;2:204–212. (In Russ.)
12. Grushko NS., Loginova EA., Potanakhina L.N. Mobility and scattering mechanisms in InGaIn-based structures *News of universities. Series. Materials of electronic engineering*. 2006;№1:68– 72. (In Russ.)
13. Markov L.K., Smirnova I.P., Pavlyuchenko A.S., Kukushkin M.V., Vasilyeva E.D., Chernyakov AE., Usikov AS. Comparison of the properties of AlGaInN LED crystals of vertical and flip-chip design using silicon as a carrier board. *Physics and technology of semiconductors*. 2013;47(3):386–391. (In Russ.)
14. Tanaka T., Takano K., Mishima T., Kohji Y., Otoki Y., Meguro T. GaN epitaxial wafers for high breakdown voltage RF transistor applications *Hitachi Cable Review*. 2005;24:11–14.
15. Мынбаева М.Г., Головатенко А.А., Печников А.И., Лаврентьев А.А., Мынбаев К.Д., Николаев В.И. Features of chloride-hydride epitaxy of nitride materials on a silicon substrate. *Physics and Engineering of Semiconductors*. 2014;48(11):1573–1577. (In Russ.)
16. Volchek VS., Stempitsky VR. Optimization of the AlGaIn/GaN HEMT design, providing a decrease in the influence of the self-heating effect using heat-sinking elements based on graphene *Gallium, indium and aluminum nitrides - structures and devices: 11th All-Russian Conf.*, Moscow, February 1-3, 2017: report summary / Lomonosov Moscow State University, Ioffe Phys.-Tech. Institute of Russian Academy of Sciences : 122–123. (In Russ.)
17. Romanov AS., Filippov SV. Semiconductor nanostructures: physics and technology. Moscow: Fizmatlit; 2015. 400 с. (In Russ.)
18. Mavroidis C., Harris J.J., Kappers M.J., Humphreys C.J., Bougrioua Z. Detailed interpretation of electron transport in n-GaN *Journal of applied physics*. 2003;93;№ 11:9095–9103.

19. Gangwani P., Pandey S., Haldar S., Gupta M., Gupta R.S. Polarization dependent analysis of AlGaN/GaN HEMT for high power applications. *Solid-state electronics*. 2007;51;№1:130–135.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 01.04.2025

Received April 1, 2025

Поступила после рецензирования 20.05.2025

Revised May 20, 2025

Принята к публикации 26.05.2025

Accepted May 26, 2025

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Сохань Кристина Сергеевна – аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kristina S. Sokhan – Graduate Student of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

[К содержанию](#)