



УДК 621.38.049.77

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.435.438

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ МИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЛАКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЙ ПЛОСКОСТИ НАД АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КРИСТАЛЛА

FEATURES OF MANUFACTURING MICROWAVE MICS USING PHOTOLAC AT FORMATION OF GROUND PLANE ABOVE THE CRYSTAL ACTIVE SURFACE

ИВАНОВА НАТАЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВНА¹
natalia.ivanova.mipt@gmail.com

IVANOVA NATAL'YA E.¹
natalia.ivanova.mipt@gmail.com

ЗЕНЧЕНКО НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ¹

ZENCHENKO NIKOLAY V.¹

ЩАВРУК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ¹

SHCHAVRUK NIKOLAY V.¹

ЕВЛАМПИЕВА ЕЛЕНА БОРИСОВНА²

EVLAMPIEVA ELENA B.²

¹ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова Российской академии наук 117105, Россия, г. Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5
mail@isvch.ru

¹ V. G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences bld. 5, 7 Nagorny Lane, Moscow, 117105, Russia
mail@isvch.ru

² Московский технологический университет (МИРЭА)

² Moscow Technological University (MIREA)

Работа посвящена решению задачи формирования заземляющей плоскости в СВЧ МИС на основе GaN на подложках сапфира. Предложено технологическое решение формирования заземляющей плоскости с использованием отечественного аналога полиимида над активной частью МИС. Проведены результаты испытаний изготовленных приборов.

Ключевые слова: СВЧ МИС; GaN; заземляющая плоскость; фотополимер; полиимид.

The work is devoted to the solution of the problem of forming a ground plane in a microwave system based on GaN on sapphire substrates. A technological solution for the formation of the ground plane has been proposed using the domestic analogue of polyimide over the active part of the MIS. The results of tests of the manufactured instruments have been presented.

Keywords: UHF MIS; GaN; ground plane; photopolymer; polyimide.

В последнее десятилетие серьезное внимание в электронике уделяется разработке элементной базы СВЧ-техники и силовой электроники на основе нитридных соединений элементов III группы. Развитие указанных приборов определяется необходимостью освоения новых более высоких частотных диапазонов, повышения мощности приборов, линейности их характеристик и улучшения эффективности.

Перспективы разработки следующего поколения СВЧ-техники связаны с прогрессом в развитии СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) на основе нитрида галлия (GaN), что обусловлено следующими преимуществами материала:

- более высокой проводимостью канала (плотность электронов до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, что на порядок выше, чем в гетероструктурах AlGaAs/GaAs);
- значительно большей пробивной напряженностью поля ($3,3 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ для GaN против $4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ в GaAs);
- меньшей чувствительностью к температуре и радиации, чем в используемых в настоящее время структурах на основе классических соединений типа АЗВ5;
- большей теплопроводностью, обеспечивающей возможность работы приборов при высоких мощностях и температурах [1].

На данный момент МИС на GaN преимущественно проектируют, используя копланарную технологию, в то время как

на GaAs используют как копланарную технологию, так и микрополосок. Пластины арсенида галлия легко утоняются и хорошо плазмохимически травятся, а гетероструктуры нитрида галлия растянут преимущественно на особотвердых подложках — сапфира и карбида кремния, что вызывает серьезные трудности при обработке материала подложки [2, 3].

Одной из основных технологических трудностей является формирование заземляющих отверстий в подложке, как видно их табл. 1; подложки сапфира и карбида кремния тяжело травятся плазмохимически.

Для преодоления данных ограничений предложено конструкторско-технологическое решение [5, 6], заключающееся в размещении земляной плоскости не на обратной стороне пластины, а на лицевой, поверх активной части МИС через слой фоточувствительного полимера (рис. 1).

Данные полимеры должны обладать следующими свойствами: хорошая адгезия к подложкам и материалам поликор, сапфир, GaAs, Al/Si, Cr/Si, Au/Si/Ni/Si/, хорошие планаризирующие свойства, высокая химическая стойкость к органическим и неорганическим соединениям, температурная стабильность до 350°C , низкая диэлектрическая проницаемость. Данными характеристиками обладают полиимиды и их аналоги [7].

Применение этих фотополимеров не требует специального оборудования, работа с ними осуществляется на стандартных



Таблица 1. Характерные параметры ИСР-травления наиболее применяемых подложек для СВЧ МИС

	Скорость травления	Селективность к ФР
Al ₂ O ₃	> 0,65 мкм/мин	> 0,7:1
SiC	> 0,3 мкм/мин	> 0,5:1
GaAs	> 4 мкм/мин	> 12:1

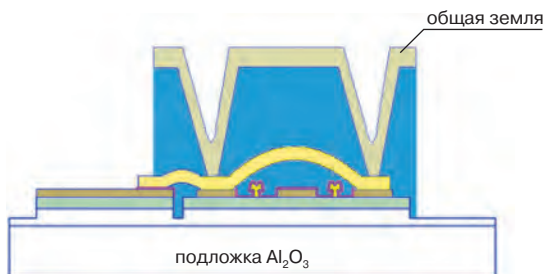


Рис. 1. Поперечное сечение пластины с межэлектрическими соединениями, обеспечивающими общую заземляющую плоскость

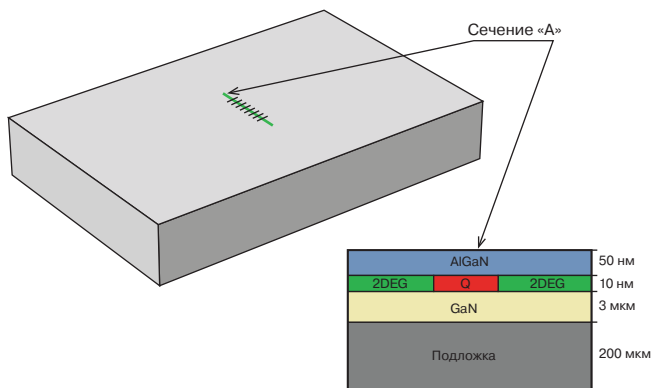


Рис. 2. Модель кристалла СВЧ МИС, где 2DEG — двумерный электронный газ, Q — область, выделяющая тепло

установках нанесения фоторезистов и литографических установках [8, 9]. В случае необходимости рисунок на фотополимере можно формировать при помощи кислородной плазмы. Благодаря этому достигается возможность решения проблемы формирования заземляющей плоскости без привлечения дополнительного дорогостоящего оборудования.

При использовании полиимида в технологическом процессе возникает ряд сложностей: существенное влагопоглощение, большой коэффициент теплового расширения, требовательность к температурному режиму хранения (23°C — 1 мес., -16°C — 9 мес.), малый срок годности готового

Таблица 2. Свойства материалов СВЧ МИС

Материал	Функция в модели	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К
GaN	гетероструктура	6070	130	490
AlGaIn		5184	40	604
Al ₂ O ₃	подложка	3965	35	730
ФЛТП	покрытие	1350	0,2	900

фоточувствительного полиимида. Однако был найден отечественный аналог полиимида — фотолак термостойкий прозрачный (ФЛТП), изготовленный в ИВС РАН, основными преимуществами которого является длительный срок хранения при комнатной температуре (23°C — 6 мес.), возможность гибкого изменения характеристик под нужды заказчика [10, 11].

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ МИС С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЛАКА

Для определения тепловых режимов работы СВЧ МИС с верхней землей было проведено математическое моделирование тепловых процессов, проходящих в СВЧ МИС, методом конечных элементов.

СВЧ МИС представляет собой усилитель мощности, основным элементом которого является восьмизатворный транзистор. Кристалл МИС с изображенными на нем источниками тепла — подзатворными областями «Q» схематично приведен на рис. 2.

В данной тепловой модели транзистора источником тепла является подзатворная часть канала «Q».

Контакт между слоями задан идеальным. Выделенная красной областью была задана как объект, генерирующий тепло.

В расчетах использовалось уравнение теплопроводности:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

где q_v — мощность внутреннего источника тепла, λ — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность вещества, C_p — теплоемкость вещества при постоянном давлении, T — температура в процессе работы.

Данное дифференциальное уравнение (1) решается методом конечных элементов при граничных условиях третьего рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = -\frac{\alpha}{\lambda} (T - T_c), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, T_c — температура окружающего пространства, n — модуль вектора нормали.

Свойства материалов, послужившие в качестве исходных данных для компьютерного моделирования, представлены в табл. 2.

В расчетах были приняты следующие условия:

- теплоотвод идеальный (принудительно задана температура для дна подложки 27°C);
- температура окружающей среды и начальная температура объекта — 27°C.

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Максимальный нагрев активной области транзистора в случае добавления ФЛТП уменьшился на 0,5%. Такое незначительное изменение связано с тем, что ФЛТП имеет низкую теплопроводность, что минимизирует количество отводимого им тепла.

Согласно результатам моделирования введение в трехмерную модель ФЛТП существенно не влияет на максимальный нагрев подзатворной области. В случае модели с применением ФЛТП максимальный нагрев составил 122,1°C, а в случае без ФЛТП — 122,4°C, что составило менее 0,1%.

Одной из особенностей изготовления СВЧ МИС с применением ФЛТП является утонение и разделение пластины

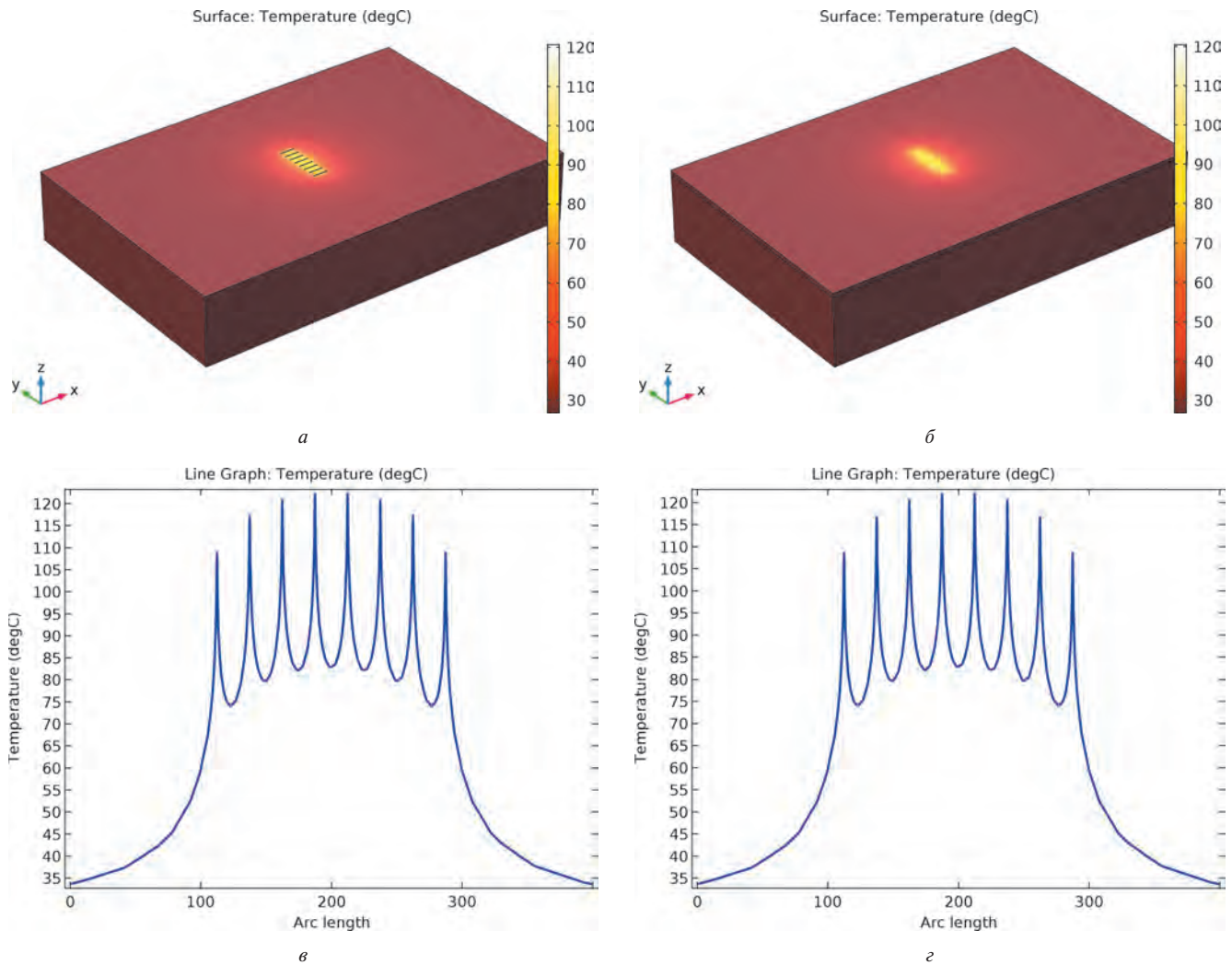


Рис. 3. Поверхностное распределение температуры в модели: а) без ФЛТП; б) с покрытием ФЛТП. Распределение температуры на поверхности МИС в районе затворов в модели; в) без ФЛТП; г) с покрытием ФЛТП

на кристаллы. Это связано с развитым рельефом поверхности пластины со сформированными СВЧ МИС, который нуждается в защитных слоях при проведении процесса утонения пластины.

Для обеспечения защиты лицевой поверхности пластины было предложено и опробовано решение, представленное на рис. 4.

Представленное решение обеспечивает химическую и температурную совместимость защитного и клеящего полимера, что гарантирует надежную защиту СВЧ МИС при операциях монтажа пластины на диск-носитель и при шлифовке и полировке пластины. В результате операции шлифовки и полировки пластины диаметром 2 дюйма разброс по толщине составляет не более 2 мкм, а шероховатость после полировки Ra — 1,86 нм.

Для операции разделения пластины на отдельные МИС был использован метод лазерного управляемого термораскалывания (ЛУТ). Как описано нами в ранее опубликованной статье [12], «для обеспечения резки в первом направлении (I) на краю пластины наносятся короткие надрезы (3), которые являются концентраторами напряжений и обеспечивают зарождение и продвижение разделяющих трещин (4). Перед резкой во втором направлении (II), чтобы получить сквозные разделяющие трещины (5) при помощи сфокусированного луча УФ-лазера (7) с длиной волны 355 нм, наносят неглубокий надрез (6) по всей длине реза либо в местах пересечений с линиями реза (4).

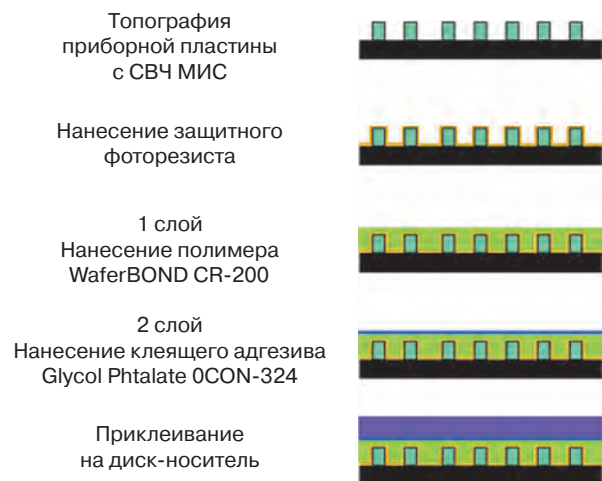


Рис. 4. Порядок приклеивания приборных пластин сапфира и карбида кремния с изготовленными на них СВЧ МИС на гетероструктурах AlGaIn/GaN на диск-носитель

Глубина и ширина надреза составляют соответственно 5–9 мкм и 5–7 мкм. Нагревая линию надреза (6) лазерным лучом (8) при помощи CO₂-лазера мощностью до 50 Вт и затем охлаждая зону

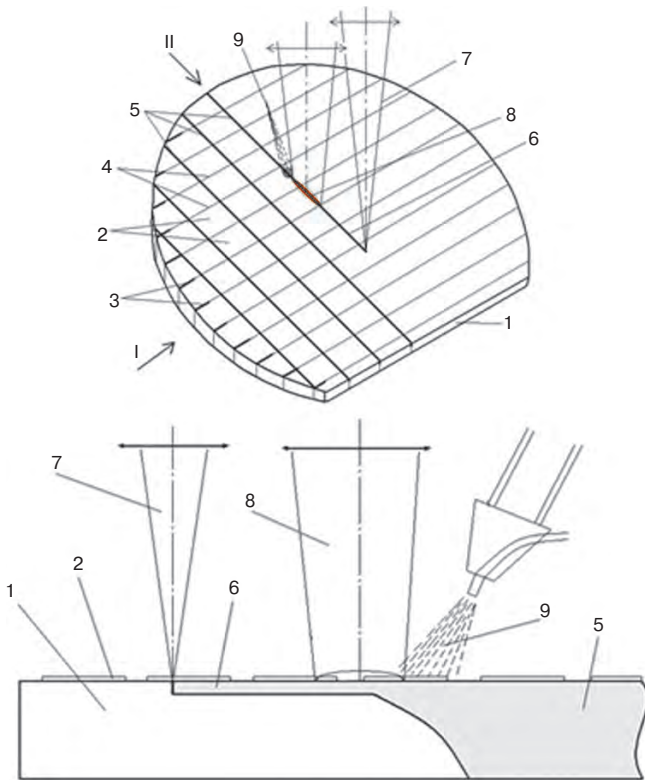


Рис. 5. Схема разделения приборных пластин со сформированными МИС на кристаллы методом ЛУТ

нагрева хладагентом (9), получаем сквозную разделяющую трещину (5). Скорость резки методом ЛУТ сапфировой пластины достигала 400–450 мм/с.

По результатам использования метода ЛУТ были рассчитаны ключевые параметры процесса резки: для дорожки реза шириной 200 мкм выход годных при резки пластины составил не менее 92%.

В ИСВЧПЭ РАН изготовлены образцы МИС СВЧ для диапазонов 57–64 ГГц, 32–36 ГГц с применением топологического решения в виде земляной плоскости над активной поверхностью МИС с использованием фотолака. Данные образцы были подвергнуты и успешно прошли испытания на стойкость к специальным факторам $7.I_1$, $7.I_6(7.I_8)$, $7.I_7$, K_{12} [13].

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты: предложен метод формирования заземляющей плоскости для МИС на основе гетероструктур AlGaIn/GaN на особотвердых подложках. Представлен отечественный аналог полиимида, для которого проведены результаты расчета теплового режима активных элементов СВЧ МИС. Данные приборы успешно прошли испытания на специальные факторы ($7.I_1$, $7.I_6(7.I_8)$, $7.I_7$, K_{12}) без кратковременной потери работоспособности, что показывает применимость фотолака для изготовления радиационно-стойкой ЭКБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакирев А., Туркин А. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике // Современная электроника, 2015. — № 4. — С. 28–32.
2. Добуш И. М., Коколов А. А., Бабак Л. И. Исследование копланарных элементов монолитных интегральных схем // Доклады ТУСУРа, № 2 (22), часть 1, декабрь 2010.
3. Iulian Rosu Microstrip, Stripline, and CPW Design // <http://www.qsl.net/va3iul>.
4. <https://www.oxford-instruments.com>.
5. Гамкрелидзе С. А., Мальцев П. П., Федоров Ю. В. Монолитные СВЧ ИС миллиметрового диапазона на основе нитридных гетероструктур с интегрированными антенными элементами // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, Т. 22, № 6, 2017. — С. 582–58.
6. Федоров Ю. В., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю., Арутюнян С. С., Иванова Н. Е., Томош К. Н., Михалев А. О. Разработка базовой технологии создания монолитных интегральных схем УМ и МШУ на нитридных наногетероструктурах для ППМ // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2015), ч. 4. МИРЭА, Москва, Россия, 2015. — С. 240–243.
7. Петрова Т. С. Формирование полиимидных межслойных изолирующих слоев ИС на GaAs // Научная сессия ТУСУР — 2004, материалы всероссийской научно-технической конференции 2004, г. Томск.
8. Бугаев А. С., Енюшкина Е. Н., Арутюнян С. С., Иванова Н. Е., Глинский И. А., Томош К. Н. Разработка технологии формирования общей земли на активной поверхности монолитной интегральной схемы усилителя мощности на нитридных гетероструктурах // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2016), ч. 4. МИРЭА, Москва, Россия, 2016. — С. 45–48.
9. Иванова Н. Е., Крапухин Д. В. Применение высокотемпературного фотополимера для формирования общей земли на активной поверхности МИС СВЧ на нитридных гетероструктурах // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2017), ч. 3. — МИРЭА, Москва, Россия, 2017. — С. 588–591.
10. Иванова Н. Е., Щаврук Н. В. Формирование заземляющей плоскости в СВЧ МИС на основе GaN // Сборник докладов Российской научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике. — МИРЭА, Москва, Россия — 2018. — С. 203–207.
11. Иванова Н. Е., Гнатюк Д. Л., Щаврук Н. В. Метод формирования заземляющей плоскости в МИС на основе нитрида галлия // Сборник трудов Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» НИЯУ МИФИ. — Москва, Россия, 2018. — С. 60–61.
12. Shchavruk N. V., Redkin S. V., Trofimov A. A., Ivanova N. E., Skripnichenko A. S., Kondratenko V. S., Stiran V. V. Partitioning Very Hard Semiconductor Sapphire Wafers into Monolithic Integrated Circuits Using Laser Controlled Thermal Cleavage // Russian microelectronics. Vol. 46. № 3. 2017. P. 201–205.
13. Арутюнян С. С., Кагирина К. А., Лаврухин Д. В., Иванова Н. Е., Гамкрелидзе С. А. Устойчивость нитридных СВЧ монолитных интегральных схем преобразователя сигнала к облучению потоком нейтронов и гамма-излучению // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2016. — Т. 21. — № 5. — С. 435–441.